

METAKAOLIININ KÄYTTÖ BETONISSA SEMENTIN  
KORVAAJANA YHDESSÄ LENTOTUHKAJALOSTEIDEN  
KANSSA

Antti Ahola, Mikko Puominen  
2010  
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

METAKAOLIININ KÄYTTÖ BETONISSA SEMENTIN  
KORVAAJANA YHDESSÄ LENTOTUHKAJALOSTEIDEN  
KANSSA

Antti Ahola, Mikko Puominen  
Opinnäytetyö  
28.9.2010  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

**OULUN SEUDUN AMMATTIKORKEAKOULU****TIIVISTELMÄ**

Koulutusohjelma

Opinnäytetyö

Sivuja

+

Liitteitä

**Rakennustekniikka****Insinöörityö****52****+****0**

Suuntautumisvaihtoehto

Aika

**Rakennetekniikka****2010**

Työn tilaaja

Työn tekijät

**Morenia Oy****Antti Ahola, Mikko Puominen**

Työn nimi

**Metakaoliinin käyttö betonissa sementin korvaajana yhdessä lentotuhkajalosteiden kanssa.**

Avainsanat

**Sementti, metakaoliini, betonin testaus**

Metakaoliini on pozzolaaninen aine, joka reagoi sementin ja veden reaktiosta syntyneen kalsiumhydroksidin ja betonissa olevien alkalien kanssa muodostaen geopolymeerisiä sidoksia. Metakaoliini tiivistää betonin tyhjää tilaa ja parantaa betonin ominaisuuksia. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin, mitkä ovat metakaoliinin vaikutukset betonin puristuslujuuteen, kun sillä korvataan sementtiä yhdessä lentotuhkista jalostettujen pozzosilikan ja biosilikan kanssa.

Opinnäytetyön alussa luotiin koeohjelma mahdollisimman monelle reseptille, jotta tutkittavia koekappaleita saatiin riittävästi. Opinnäytetyöhön kuuluvat kokeet olivat pääsääntöisesti puristuslujuuskokeita, mutta myös tuoreen betonin merkittävimmät ominaisuudet haluttiin selvittää. Koeohjelman mukaiset betonimassat valmistettiin helmi- ja maaliskuussa 2010 ja opinnäytetyöhön kuuluvat testit suoritettiin kevään 2010 aikana.

Opinnäytetyön tuloksien mukaan metakaoliinilla voidaan korvata osa sementistä yhdessä lentotuhkajalosteiden kanssa. Metakaoliini tiivistää betonia ja tekee siitä kestävämmän ympäristön vaikutuksille. Lisäksi se vähentää lentotuhkien käytön haittavaikutuksia. Tuloksista päätellen metakaoliini myös kasvattaa lisäaineiden käytön tarvetta. Oikealla korvausasteella on mahdollista saada lujempaa, ja samalla myös ympäristöystävällisempää betonia, sillä metakaoliinin valmistuksessa syntyvät hiilidioksidipäästöt ovat vähintään puolet pienemmät verrattuna sementin valmistukseen.

Line

Structural Engineering

Date

2010

Commissioned by

Morenia Ltd

Author

Antti Ahola, Mikko Puominen

Thesis title

Use of Metakaolin with Refined Fly Ashes in Concrete as Substitute of Cement

Keywords

Cement, metakaolin, compressive strength

Metakaolin is pozzolanic substance which reacts with calcium hydroxide and alkalies. This kind of reaction forms geopolymeric bonds in concrete. Metakaolin fills out the empty space of concrete and this improves the properties of concrete. In this thesis, it was studied how the compressive strength of concrete changes when a part of cement is replaced with metakaolin and refined substances of the fly ashes pozzolan silica and bio silica.

In the beginning of this work, a test-program was created to several receipts to get enough test pieces for the study. The main test for this thesis work was to test the compressive strength of the test pieces. Also, the main characteristics of the fresh concrete was wanted to be investigated. Concrete mass accordant with the test-program were made in February and March 2010 and the tests were executed during the spring 2010.

The result of this thesis work is that part of cement can be replaced with metakaolin and refined fly ashes. Metakaolin makes the concrete thicker and makes it more resistant to environmental effects. It also decreases the disadvantages of the usage of the fly ashes. It can be concluded from the results that the usage of metakaolin increases the need to use the supplements, as well. It is possible to get stronger and also more environmental friendly concrete with the correct replacement ratio. Also, the carbon monoxide emission is decreased to half when making metakaolin compared to making the traditional cement.

# SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT.....	4
SISÄLTÖ.....	5
1 JOHDANTO.....	7
2 BETONI.....	9
2.1 Betonin koostumus.....	9
2.1.1 Kiviaines ja vesi.....	10
2.1.2 Sementti.....	10
2.1.3 Lisäaineet.....	16
2.2 Yleisesti käytetyt sementtilajit.....	18
2.2.1 Pikasementti.....	19
2.2.2 Perussementti.....	20
2.2.3 Rapidsementti.....	20
2.2.4 Yleissementti.....	20
2.2.5 SR-sementti.....	20
2.2.6 Valkosementti.....	21
2.2.7 Muut sementit.....	21
2.3 Pozzolaaniset sideaineet.....	22
2.3.1 Lentotuhka.....	22
2.3.2 Silika.....	23
2.3.3 Masuunikuonajauhe.....	24
2.4 Metakaoliini.....	25
2.4.1 Metakaoliinin valmistus.....	26
2.4.2 Metakaoliinin ominaisuudet.....	27
3 BETONIN TESTAUKSEN KOEOHJELMA.....	28
3.1 Koevariantit.....	28
3.2 Koekappaleet.....	30
3.3 Kokeet.....	34
3.3.1 Tuoreen betonin kokeet.....	34
3.3.2 Kovettuneen betonin kokeet.....	36
4 TUOREEN JA KOVETTUNEEN BETONIN KOETULOKSET.....	39

5	KOETULOSTEN KÄSITTELY JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	41
6	YHTEENVETO .....	49
	LÄHTEET .....	50

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia betonissa käytetyn Portland-sementin osittaista korvaamista kaoliinista jalostetulla metakaoliinilla. Kaoliinia louhitaan Suomen Kainuussa, Puolangan kunnassa. Kaoliini on oikein jalostettuna pozzolaaninen aine, joka reagoi sementin ja veden reagoimisesta syntyneen kalsiumhydroksidin kanssa (Eijärvi – Gehör 2009, 7). Opinnäytetyön tilaajana on yksi Suomen suurimmista maa-ainestoimittajista, Morenia Oy, ja sen perustana on Morenia Oy:n, Oulun yliopiston ja Kainuun Etu Oy:n vuonna 2009 tekemä yhteishanke: Valikoitujen teollisuusmineraalien etsintä ja hyödyntäminen Kainuussa (Eijärvi – Gehör 2009). Tutkimuspaikkana opinnäytetyössä oli Oulun seudun ammattikorkeakoulun rakennustekniikan laboratorio.

Suomesta saaduista kaoliinivaroista jalostettua metakaoliinia ei ole tutkittu Morenia Oy:n teettämien tutkimusten lisäksi. Muualla maailmassa metakaoliinia on käytetty geopolymeerin raaka-aineena, ja esimerkiksi Amerikan ilmavoimat on käyttänyt sitä valmistaessaan muutamassa tunnissa laskeutumiskelpoisiksi kovettuvia kiitoratoja (Geopolymer cement 2010). Jatkossa Morenia Oy tutkii mahdollisuutta valmistaa metakaoliinista aktiivista geosementtiä, jolla voitaisiin joissakin käyttökohteissa korvata Portland-sementti kokonaisuudessaan.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia metakaoliinin vaikutusta betonin puristuslujuuksiin ja saada vertailutuloksia jo aiemmin tehtyjen samanlaisten kokeiden tuloksiin. Tarkoituksena oli selvittää suotuisat metakaoliini-lentotuhka-sementtisuhteet. Opinnäytetyössä suoritettut kokeet ja kirjallinen osuus tehtiin parityönä.

Opinnäytetyössä valmistettiin betonia samalla suhteutuksella mahdollisimman useita koe-eriä, joissa metakaoliinin ja lentotuhkien suhdetta sementtiin kasvatettiin jokaista koe-erää kohden. Jokaisesta koe-erästä valmistetuille koekappaleille suoritettiin puristuslujuuskoe. Puristuslujuuksia mitattiin saman

koe-erän kappaleista useina eri ajankohtina, jotta saataisiin mahdollisimman hyvin selville betonin lujuuden kehitys ajan funktiona ja toisaalta taas metakaoliinin vaikutus kyseiseen kehitykseen. Betonierät tehtiin kevään 2010 aikana ja koekappaleiden puristuslujuudet mitattiin seuraavan neljän viikon aikana kustakin koe-erän valmistuspäivästä.

Morenia Oy:llä on meneillään samanaikaisesti useita Oulun seudun ammattikorkeakouluun tehtäviä opinnäytetöitä liittyen metakaoliinin käyttöön betoniteollisuudessa (Nikula 2010). Tässä opinnäytetyössä käsitellään ainoastaan metakaoliinin vaikutukseen betonin puristuslujuudessa. Koesarjoja tehtiin vain yhdellä betonin lujuusluokalla, jotta työhön saatiin sisällytettyä mahdollisimman monta erilaista metakaoliini-lentotuhka-sementtiyhdistelmää.

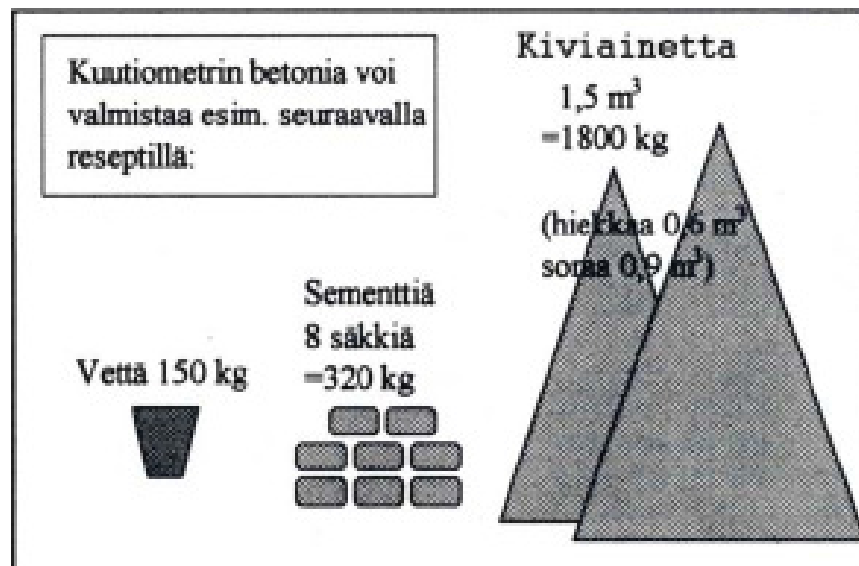


## 2 BETONI

Luvussa 2 on selvitetty kirjallisuudesta saatujen tietojen perusteella betonin ja sen valmistuksessa yleisesti käytettävien sideaineiden ominaisuuksia. Lisäksi tutkittavista lentotuhkajalosteista ja metakaoliinista on esitetty valmistusmenetelmät, tärkeimmät ominaisuudet sekä käyttötarkoitukset.

### 2.1 Betonin koostumus

Betoni on keinotekoisesti valmistettu kivi, joka erityisesti puristuslujuutensa ansiosta on erittäin laajasti käytetty rakennusmateriaali. Betonissa käytettäviä pääraaka-aineita ovat sementti, vesi ja kiviainekset (kuva 1). Haluttuja ominaisuuksia betonissa voidaan muokata käyttämällä lisä- ja seosaineita esimerkiksi betonin työstettävyyden lisäämiseksi tai kovettuneen betonin lujuuden, tiiveyden ja säilyvyysominaisuuksien parantamiseksi. (Betoniteknikan oppikirja 2004. 2005, 31.)



KUVA 1. Esimerkki betonin valmistusreseptistä (Betoniteknikan oppikirja 2004. 2005, 31)

### 2.1.1 Kiviaines ja vesi

Betonin koostumuksesta riippuen runkoaineen osuus betonimassassa on 65–80 %. Betoninormien mukaan betonin valmistamiseen käytettävän kiviaineksen on oltava standardin SFS-EN 12620 mukaista ja CE-merkittyä. Kiviaines ei saa sisältää haitallisia määriä epäpuhtauksia, kuten roskia, humusta, jätteitä ja öljyä. Myös lumi, jää ja jäätyneet kivikokkareet ovat heikentäviä tekijöitä betonin ominaisuuksille. (Betonitekniikan oppikirja 2004. 2005, 32.)

Betonin valmistamisessa käytettävän veden täytyy olla puhdasta. Periaatteena voidaan pitää sitä, että juomakelpoinen vesi kelpaa betonin valmistamiseen. Humuspitoinen suovesi, paljon leviä ja pieneliöitä sisältävä vesi, sekä saastunut jätevesi voivat vaikeuttaa sementin hydratoitumista, ja heikentää sementin tartuntaa runkoainerakeisiin. Jos vesi ei maistu tai haise pahalta ja näyttää puhtaalta, voi sitä yleisesti käyttää betonin valmistukseen. Tarkka veden kemiallinen analyysi antaa luotettavan tiedon veden kelpoisuudesta. (Betonitekniikan oppikirja 2004. 2005, 62–63.)

### 2.1.2 Sementti

Portland-sementti on pääosin kalkkikivestä valmistettu hydraulinen sideaine, joka reagoidessaan veden kanssa muodostaa kovan ja pysyvän sidoksen. Se säilyttää lujuutensa ja stabiilisuutensa myös vedessä. Pääosana kalkkikivessä on kalsiumkarbonaatti  $\text{CaCO}_3$ . Muut sementin valmistuksessa käytettävät tuotteet saadaan kalkkilouhoksessa syntyvästä sivukivestä ja muun teollisuuden tuotteista. Näitä aineita ovat piioksidi  $\text{SiO}_2$  (lyhenne S), rautaoksidi  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (lyhenne F) ja alumiinioksidi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (lyhenne A). (Betonitekniikan oppikirja 2004. 2005, 39.)

Betonin valmistuksessa käytettävien sementtien tulee täyttää standardin SFS-EN 197-1 vaatimukset. Taulukossa 1 on esitetty sementtistandardin mukainen sementtien ryhmittely viiteen päälajiin niiden koostumuksen perusteella.

Päälaajit, CEM I – CEM V, ovat edelleen jaettu eri sementtilajeihin käytetyn seosaineen ja seosainemäärien perusteella. (Betoniteknikan oppikirja 2004. 2005, 39,42.)

**TAULUKKO 1. Sementtien vaatimusten mukaiset koostumukset (SFS-EN 197-1 2004, 12)**

Päälaajit	27 tuotteen esittely (tavallisten sementtien lajit)		Koostumus painoprosenteina <sup>a</sup>											
			Pääosa-aineet										Sivusa- aineet	
			Klinkkeri	Masuuri- kuona	Silika	Pozzolaani luonnon	Luonnon kalsinoitu	Lentotuhka silikaatti- pitoinen	kalldi- pitoinen	Poltettu liuske	Kalkki-kivi			
			K	S	D <sup>b</sup>	P	Q	V	W	T	L	LL		
CEM I	Portlandsementti	CEM I	95-100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
CEM II	Portlandmasuunikuona- sementti	CEM II/A-S	80-94	6-20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
	Portlandsilikasementti	CEM II/A-D	90-94	–	6-10	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
	Portlandpozzolaanisementti	CEM II/A-P	80-94	–	–	6-20	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-P	65-79	–	–	21-35	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	–	–	–	6-20	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	–	–	–	21-35	–	–	–	–	–	–	0-5
	Portlandlentotuhkasementti	CEM II/A-V	80-94	–	–	–	–	6-20	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-V	65-79	–	–	–	–	21-35	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-W	80-94	–	–	–	–	–	6-20	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-W	65-79	–	–	–	–	–	21-35	–	–	–	–	0-5
	Portlandpoltettu- liuskesementti	CEM II/A-T	80-94	–	–	–	–	–	–	6-20	–	–	–	0-5
		CEM II/B-T	65-79	–	–	–	–	–	–	21-35	–	–	–	0-5
	Portlandkalkkikivisementti	CEM II/A-L	80-94	–	–	–	–	–	–	–	–	6-20	–	0-5
		CEM II/B-L	65-79	–	–	–	–	–	–	–	–	21-35	–	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	–	–	–	–	–	–	–	–	–	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	–	–	–	–	–	–	–	–	–	21-35	0-5
	Portlandseossementti <sup>c</sup>	CEM II/A-M	80-94	<----- 6-20 ----->										0-5
		CEM II/B-M	65-79	<----- 21-35 ----->										0-5
CEM III	Masuunikuonasementti	CEM III/A	36-64	36-65	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
CEM IV	Pozzolaanisementti <sup>c</sup>	CEM IV/A	65-89	–	<----- 11-35 ----->					–	–	–	0-5	
		CEM IV/B	45-64	–	<----- 35-55 ----->					–	–	–	0-5	
CEM V	Seossementti <sup>c</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	–	<----- 18-30 ----->				–	–	–	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	–	<----- 31-50 ----->				–	–	–	0-5	

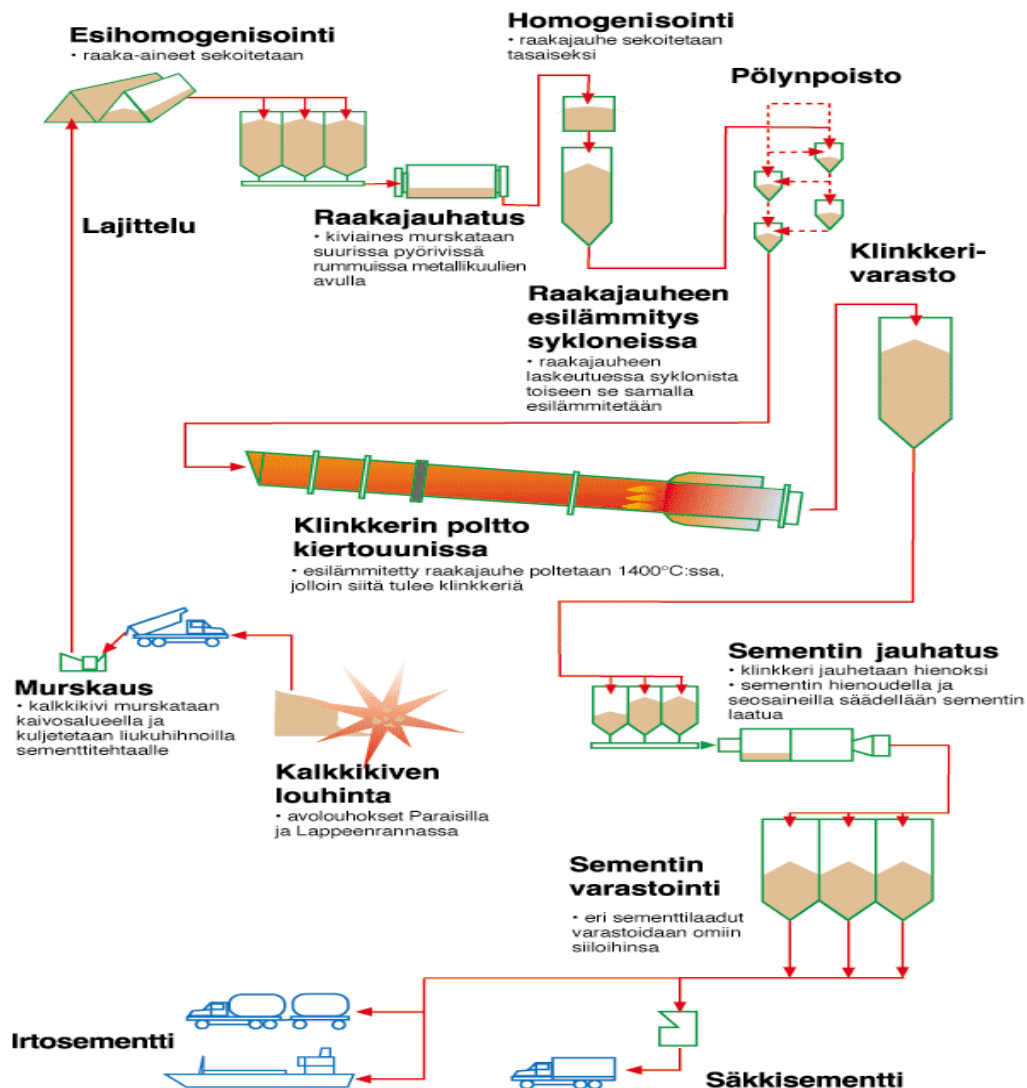
<sup>a</sup> Taulukon arvoilla viitataan pää- ja sivusa-aineiden summaan.

<sup>b</sup> Silikan määrä on rajoitettu 10 %:iin.

<sup>c</sup> Portlandseossementeissä CEM II/A - M ja CEM II/B - M, pozzolaanisementeissä CEM IV/A ja CEM V/A ja CEM V/B tulee muut pääkomponentit kuin klinkkeri ilmoittaa sementin merkinnässä (ks. esimerkki kohdasta 8)

**Sementin valmistukseen** on käytetty Suomessa kuivamenetelmää 1970-luvulta lähtien. Se on energiankulutuksen kannalta edullisin valmistusmenetelmä. Kuivamenetelmäprosessin periaate on esitetty kuvassa 2. Siinä raaka-aineeksi louhittu kalkkikivi murskataan ja lajitellaan kaivosalueella, minkä jälkeen se kuljetetaan sementtitehtaalte. Lajiteltu kiviaines siirretään raaka-ainesiloihin. Silloista sekoitettu kiviaines syötetään

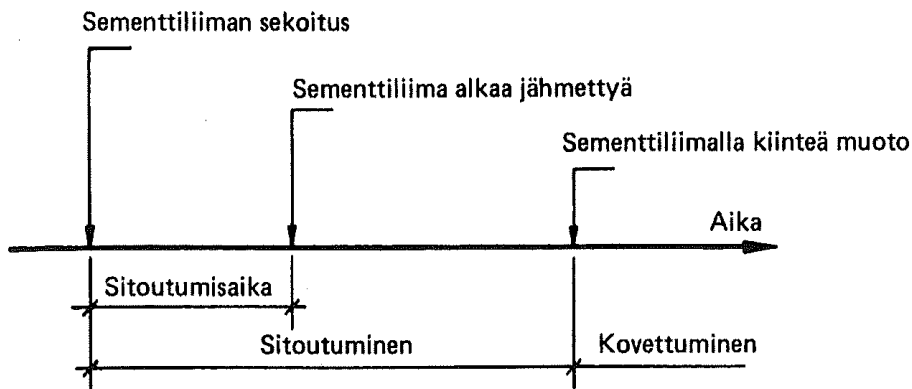
raakajauhemylyyn, jossa se jauhetaan hienoksi. Valmis raakajauhe syötetään esilämmitys järjestelmään, josta se putoaa kiertouuniin. Noin 100 metrin mittaisessa kiertouunissa tapahtuu sementtiklinkkerin poltto. Kalkki-, pii-, alumiini- ja rautayhdisteet muuttuvat kalsiumyhdisteiksi ja sintraantuvat sementtiklinkkeriksi, kun materiaalin lämpötila nousee +1400 °C:een. Uunin loppupäässä sementtiklinkkeri jäähdytetään ilmajäähdyttimissä nopeasti noin 200 °C:een. Klinkkeri muistuttaa tässä vaiheessa karkeaa soraa. (Betonitekniiikan oppikirja 2004. 2005, 39–40.)



KUVA 2. Sementin kuivamenetelmän valmistusprosessi (Betonitekniiikan oppikirja 2004. 2005, 41)

Rakennussementit valmistetaan jauhamalla klinkkeriä, seosaineita ja kipsiä kuulamylyllä hienoksi jauheeksi. Seosaineena käytetään kalkkikiveä ja raemaiseen muotoon saatettua masuunikuonaa. Rakennusementtien ominaisuuksia säädetään klinkkerin koostumuksella, jauhatushienoudella ja seosaineiden suhteilla. (Finnsementti. 2010, linkki Sementit.)

**Sitoutuminen** alkaa sementin ja veden sekoituksen jälkeen. Seos on aluksi notkeaa, mutta jonkin ajan kuluttua pasta alkaa hyytelöityä ja menettää plastisuuttaan. Hyytelön kiinteys lisääntyy tämän jälkeen ajan funktiona ja kovettuminen alkaa. (Betonitekniiikan oppikirja 2004. 2005, 51.) Kuvassa 3 on esitetty betonimassan sitoutumisen vaiheet.



KUVA 3. Sementtiliiman sitoutuminen ja kovettuminen (Betonitekniiikan oppikirja 2004. 2005, 53)

Sementin sitoutumisaikaan vaikuttaa sen kemiallinen koostumus ja hienous. Sementin sitoutumisajan säätämiseksi siihen lisätään kipsiä. Sitoutumisaikaan vaikuttaa voimakkaasti myös lämpötila. Lämpötilan noustessa 10 °C sitoutumisaika lyhenee noin puoleen. Kylmä ilma puolestaan hidastaa sementin sitoutumista, mikä on syytä huomioida talvella. Jos sitoutumisvaiheessa olevaa pastaa tai betonia häiritään, muodostuneet liimasauvat rikkoutuvat ja seurauksena voi olla lujuushäviö. (Betonitekniiikan oppikirja 2004. 2005, 51.)

**Lujuudenkehitys** alkaa sitoutumisen päätyttyä kovettumisella, eli lujuusreaktioilla. Lujuusreaktiot jatkuvat niin kauan kuin hydratoitumiseen

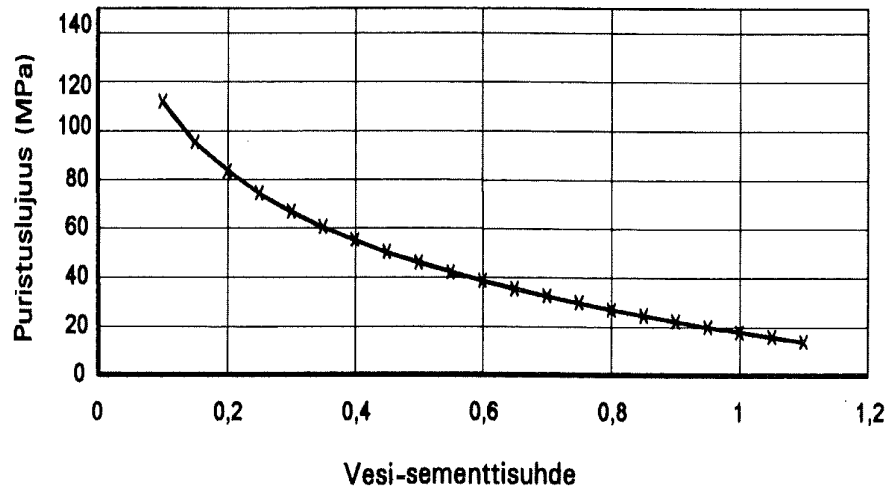
osallistumiskykyistä vettä on käytettävissä. Sementin lujuudenkehitykseen vaikuttaa eniten betonin vesi-sementtisuhte kuvassa 4 olevan kaavion mukaan. Vesi-sementtisuhte  $w$  voidaan määrittää kaavalla 1.

$$w = \frac{v}{s}$$

KAAVA 1

$v$  = veden massa

$s$  = sementin massa



KUVA 4. Betonin puristuslujuus vesi-sementtisuhteen eri arvoilla (Betoniteknikan oppikirja 2004. 2005, 54)

Sementti muodostaa veden kanssa kovan huokoisen mineraalin eli sementtikiven, joka kiinnittää runkoainerakeet sekä mahdollisen raudituksen ja pigmentit toisiinsa. Kovettumisreaktio eli ns. hydrataatioreaktio tapahtuu sementin ja veden välillä, joten betonin pitäminen märkänä on kovettumisen edellytys. Sementin hydrataatiolla tarkoitetaan sementin reaktiota veden kanssa, mikä johtaa kemiallisiin ja fysikaalisiin muutoksiin sementin ja veden seoksessa. Betonin kovettumisessa ei ole kysymys kuivumisesta. Betoni kovettuu myös veden alla. Sementin kovettuessa siitä muodostuu veteen liukenemattomia tuotteita. (Sementti. 2010.)

Sementin raaka-aineiden kalsiumkarbonaatin, rautaoksidin, alumiinin ja silikan reagoidessa uunissa syntyy sementin neljä päämineraalia: trikalsiumsilikaatti, dikalsiumsilikaatti, trikalsiumaluminaatti ja tetrakalsiumaluminaattiferriitti. Sementti sisältää myös pieniä määriä muita materiaaleja, kuten natrium- ja kaliumoksideja, jotka aiheuttavat betonille sen alkalisuuden. Kun sementti joutuu kosketuksiin veden kanssa, sen eri ainesosat alkavat hydratoitua aiheuttaen betonin kovettumisen. (Betoni on monipuolinen rakennusmateriaali. 2006, 1.)

Trikalsiumsilikaatti hydratoituu nopeimmin saaden aikaan betonin varhaislujuuden kehittymisen. Dikalsiumsilikaatti hydratoituu huomattavasti hitaammin, ja se on tärkein tekijä lujuuden kehityksessä 28 vuorokauden jälkeen. Trikalsiumaluminaatti reagoi veden kanssa voimakkaasti ja voi aiheuttaa liian nopean kovettumisen. Tämän reaktion hidastamiseksi sementtiin lisätään kipsiä, jonka sisältämien sulfaattien vaikutuksesta trikalsiumaluminaatista syntyy etringiittiä, joka hajoaa nopeasti uudelleen. Trikalsiumaluminaatti saavuttaa suurimman osan lujuudestaan ensimmäisen vuorokauden aikana. Tetrakalsiumaluminaatti reagoi myös nopeasti, mutta sillä ei ole juurikaan vaikutusta betonin lujuuden kehitykseen. (Betoni on monipuolinen rakennusmateriaali. 2006, 1.)

Betoniin lisätään sen työstettävyyden takia enemmän vettä kuin hydrataatioreaktioon tarvitaan. Sementtirakeet muodostavat vedessä pieniä ryhmiä, jolloin vesi täyttää niiden väliin jääneet aukot. Sementin hydratoituessa sementtirakeen ympärille muodostuu geeliä, ja niiden ulkopuolisiin aukkoihin muodostuu kalsiumhydroksidia. Geeli hidastaa hydrataatioreaktiota, mutta lopulta sementtirakeiden välit alkavat täyttyä geelillä. Geelin laajetessa ja sementin kovettuessa vesi jää kapillaarihuokosiin. (Betoni on monipuolinen rakennusmateriaali. 2006, 1.)

Betonin sisältämä vesi voidaan jakaa kemiallisesti sitoutuneeseen veteen, geeliveteen ja vapaaseen veteen veden "pysyvyysasteen" perusteella. Samalla perusteella betonin seosvesi voidaan vaihtoehtoisesti jakaa myös haihtuvaan ja ei-haihtuvaan. Ei-haihtuva vesi koostuu pääasiallisesti kemiallisesti

sitoutuneesta vedestä. Kemiallisesti sitoutuneen veden määrä voidaan määrittää kuivattamalla betonia alle +105 °C lämpötilassa, jolloin jäljelle jäävän veden määrä kasvaa sementin hydrataation edetessä. Kemiallisesti sitoutuneen veden enimmäismäärä on noin 25 painoprosenttia sementin massasta täysin hydratoituneella betonilla. Käytännössä sementin hydratoituminen ei koskaan tapahdu täydellisesti. (Betoni on monipuolinen rakennusmateriaali. 2006, 2 ; Lindberg – Wahlman – Suonketo – Paukku 2002, 5.)

### 2.1.3 Lisäaineet

Lisäaineita käyttämällä voidaan säädellä betonimassan ominaisuuksia, betonin sitoutumista, kovettumista sekä kovettuneen betonin ominaisuuksia. Lisäaineiden vaikutustapa on joko kemiallinen tai fysikaalinen. Niiden määrät betonissa ovat hyvin pieniä verrattuna betonin muihin osa-aineisiin. (Betonitekniikan oppikirja 2004. 2005, 63.)

**Notkistavia** lisäaineita käyttämällä vesimäärää voidaan vähentää. Tämän johdosta betonin lujuus ja koossapysyvyys paranevat. Notkistavat lisäaineet ovat pinta-aktiivisia aineita, jotka toimivat sementin ja veden rajapinnoilla. Ne muodostavat sementtihiukkasten ympärille ohuen kalvon, joka pitää sementtihiukkaset erillään toisistaan. Sementin ja veden kontaktipinnan suurentuessa vesi pääsee paremmin tunkeutumaan sementtihiukkasten väliin ja betonin työstettävyyttä paranevat. (Betonitekniikan oppikirja 2004. 2005, 64–65.)

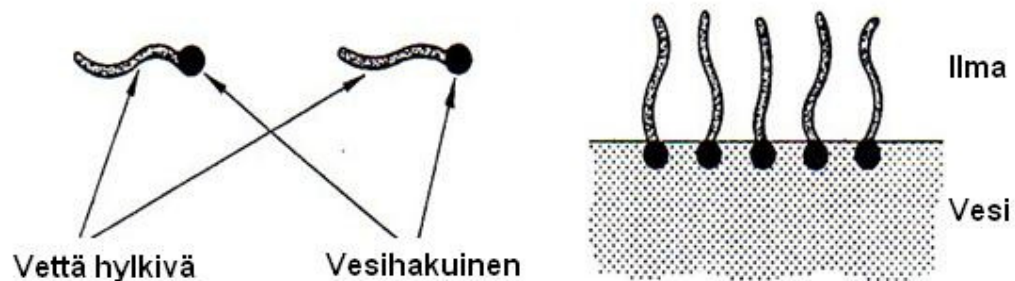
Notkistimet jaetaan ryhmiin niiden tehokkuuden perusteella, ja niillä saadaan aikaan noin 5–15 % vedenvähennys sekä tehonotkistimilla noin 12–30 % vedenvähennys betonin muokattavuuden heikentymättä. Yleensä notkistavien lisäaineiden osuus betonissa on 1–1,5 % sideaineen kokonaismäärästä. (Finnsementti. 2010, linkki Lisäaineet.)

**Huokostavien** lisäaineiden avulla betonin pakkasenkestävyyttä saadaan parannettua nostamalla betonin ilmamäärä 4–8 %:in, sen ollessa normaalisti 1–2 %, eli 10–20 dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Kun betonin lämpötila laskee 0 °C:n alapuolelle, sen

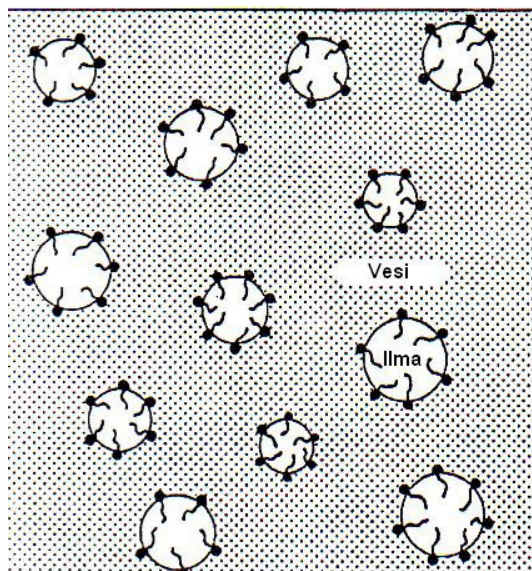


sisältämä vesi alkaa jäätyä. Jäätyessään vesi laajenee lähes 10 %. Jos betonin kaikki huokokset ovat täynnä vettä, laajeneminen aiheuttaa mikrohalkeilua. Halkeilu lisääntyy jäätymis- ja sulamiskertojen toistuessa ja johtaa lopulta betonin rapautumiseen. Huokostimet muodostavat betoniin pieniä ilmakuplia, jotka toimivat jäätyvän veden pakotiloina sen tilavuuden kasvaessa. (Betonitekniikan oppikirja 2004. 2005, 66–67.)

Huokostimien raaka-aineet ovat molekyylejä, joille on luuteenomaista hydrofiiliset (vesihakuiset) ja hydrofobiset (vettähylkivät) molekyyliryhmät. Molekyyliryhmien periaatteellinen toiminta on esitetty kuvissa 6 ja 7.



KUVA 6. Huokostimien käyttäytyminen veden vaikutuksesta (Huokostetun betonin valmistus. 2004, 3)



KUVA 7. Ilmahuokosten syntyminen betonissa (Huokostetun betonin valmistus. 2004, 3)

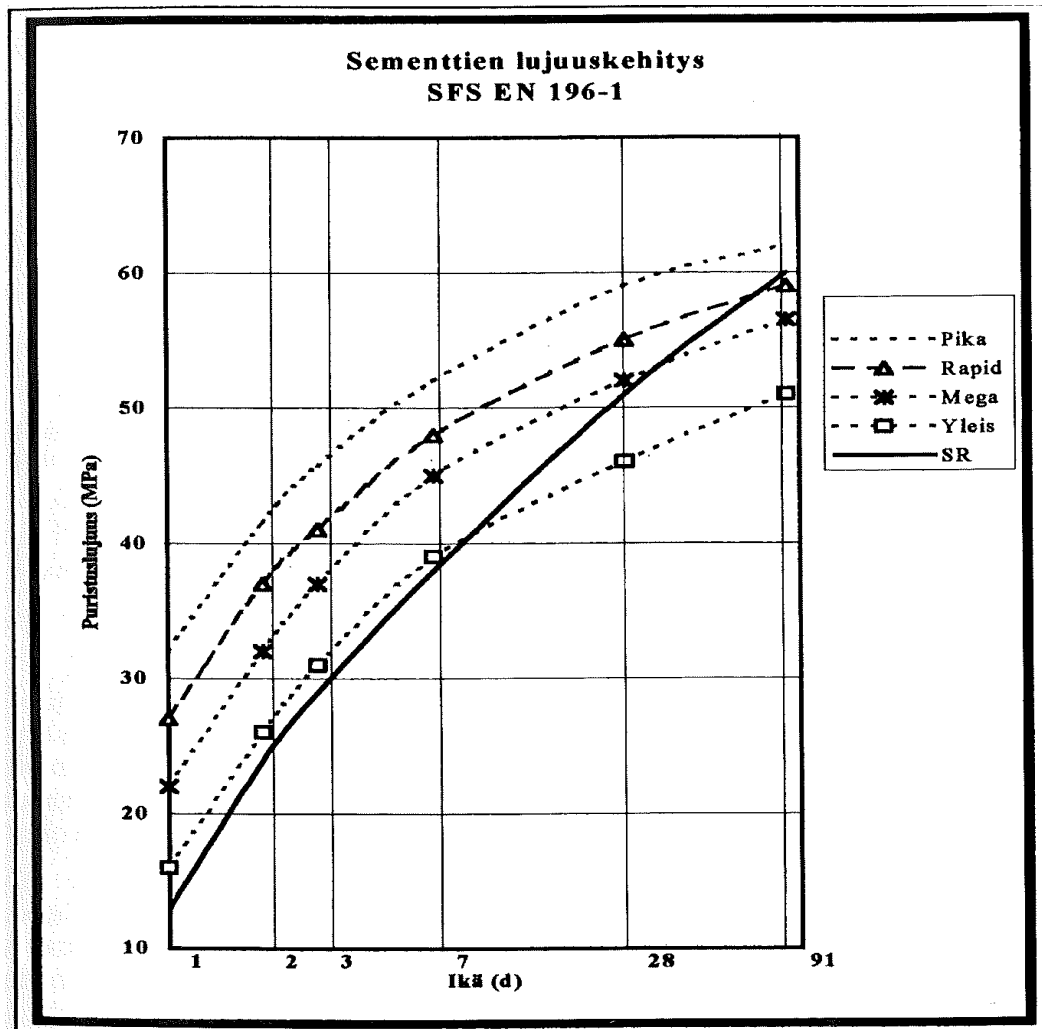
Huokosten ansiosta betonimassan muokattavuus, notkeus ja koossapysyvyys paranevat sekä osa-aineiden erottuminen vähenee. Haittana huokoistamisella on kovettuneen betonin lujuuden aleneminen. (Huokostetun betonin valmistus. 2004, 3.)

**Hidastin** hidastaa betonin kovettumista. Sen tärkeimmät aineosat ovat lingnosulfaatteja tai niiden johdannaisia sekä hydroksyylikarboksyylihappoja ja niiden suoloja. Hidastimia käytetään esimerkiksi siirtämään sitoutumista myöhemmäksi pitkien kuljetusmatkojen yhteydessä sekä kohteissa, joissa halutaan välttää työsaumoja. Hidastimen vaikutus kohdistuu trikalsiumaluminaattiin, ja se myös peittää sementtirakeen pinnan estäen sen kontaktin veden kanssa. Joillakin hidastimilla on myös notkistava vaikutus, joten se vähentää betoniin tarvittavaa veden määrää, ja näin ollen loppulujuus on korkeampi kuin hidastamattoman betonin. (Betoni on monipuolinen rakennusmateriaali. 2006, 3.)

**Kiihdyttimiä** käytetään nopeuttamaan betonin sitoutumista ja kovettumista muottien purkamislujuuden tai betonin jäätymislujuuden saavuttamisen nopeuttamiseksi. Nykyään kiihdyttimien käyttö on kuitenkin vähentynyt sen haittavaikutusten, kuten teräskorroosion vuoksi, ja koska betonin sitoutumista ja lujuudenkehitystä saadaan hallitummin parannettua muilla tavoin. Kalsiumkloridi oli aikaisemmin käytetyin kiihdytin, mutta nykyään sen käyttö on kielletty sen aiheuttaman raudoitusten korroosion vuoksi. (Betonitekniikan oppikirja 2004. 2005, 68.)

## 2.2 Yleisesti käytetyt sementtilajit

Betonin valmistukseen käytettävä sementti valitaan betonin käyttötarkoituksen ja haluttujen ominaisuuksien perusteella. Jokaisella sementtilajilla on erilainen vaikutus betonin lujuudenkehitykseen. Kuvassa 8 on esimerkkejä muutamien eri sementtilajien lujuudenkehityksestä ajan funktiona.



KUVA 8. Eri sementtilajien lujuuskehityksiä ajan funktiona (Betonitekniikan oppikirja 2004. 2005, 55)

### 2.2.1 Pikasementti

Pikasementti on erittäin nopeasti kovettuva Portland-sementti (CEM I 52,5 R). Se on rakennussementti, jolle ovat ominaista korkeat alku- ja loppulujuudet. Nopean lujuudenkehityksensä vuoksi se sopii nopeaa muottikiertoa vaativaan elementtituotantoon. Pikasementti soveltuu myös valmisbetoniin kylmänä aikana sekä erilaisten betonituotteiden, kunnallisteknisten tuotteiden ja harkkojen valmistukseen. (Finnsementti. 2010, linkit Sementit -> Pika.)

### **2.2.2 Perussementti**

Perussementti on normaalisti kovettuva Portland-seossementti (CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N). Perussementti soveltuu kaikkeen betonirakentamiseen, missä alkuvaiheen lujuudenkehitysnopeudelle ei ole asetettu erityisvaatimuksia. Yksi sen erityiskäyttökohteista on stabilointi. (Finnsementti. 2010, linkit Sementit -> Perus.)

### **2.2.3 Rapidsementti**

Rapidsementti on nopeasti kovettuva Portland-seossementti (CEM II/A-LL 42,5 R). Se on rakennussementti, jonka alku- ja loppulujuudet ovat korkeat. Lisäksi se soveltuu nopeaa muottikiertoa vaativaan elementtituotantoon ja erilaisten betonituotteiden valmistukseen käytettäessä alhaista vesi-sementtisuhdetta. Rapidsementti sopii nopeutensa ansiosta erittäin hyvin talvibetonointiin. Myös valmisbetoni voidaan tehdä Rapidsementillä. Kun siihen sekoitetaan masuunikuonajauhetta, siitä voidaan valmistaa massiivisiin rakenteisiin käytettävää alhaislämpöbetonia. (Finnsementti. 2010, linkit Sementit -> Rapid.)

### **2.2.4 Yleissementti**

Yleissementti on normaalisti kovettuva Portland-seossementti (CEM II/A-M(S-LL) 42,5 N). Edullisuutensa vuoksi se soveltuu hyvin valmisbetoniin, betonielementteihin ja sideaineeksi erilaisten betonituotteiden ja harkkojen valmistukseen. Yleissementtiä käytetään myös vaativissa ja säänrasituksille alttiiksi joutuviissa kohteissa. Stabilointi on yksi Yleissementin erityiskäyttökohteista. (Finnsementti. 2010, linkit Sementit -> Yleis.)

### **2.2.5 SR-sementti**

SR-sementti on normaalisti kovettuva sulfaatin kestävä Portland-sementti (CEM I 42,5 N). SR-sementille ominaista on erinomainen sulfaatinkestävyys. Siksi sitä käytetään esimerkiksi puunjalostusteollisuuden ja kemianteollisuuden

rakenteisiin sekä perustuksiin, jotka joutuvat alttiiksi maaperän sulfaattirasitukselle. SR-sementillä on kohtuullinen lämmöntuotto ja helppo huokoistettavuus, joten se sopii erinomaisesti myös siltojen betonointiin. SR-sementtiä voidaan mainiosti käyttää myös korkealujuusbetonin valmistamiseen, koska sen vedentarve on pieni ja loppulujuus korkea. (Finnsementti. 2010, linkit Sementit -> SR.)

### **2.2.6 Valkosementti**

Valkosementti on valkoinen Portland-sementti (CEM I 52,5 R), jota käytetään valkoisten betonituotteiden ja elementtien valmistukseen. Käyttämällä valkosementtiä tai valkosementin ja harmaan sementin seosta, värillisen betonin väristä saadaan kirkkaampi. Valkosementtiä voidaan käyttää myös kuivatuotteiden, erilaisten laastien ja tasoitteiden valmistukseen. (Finnsementti. 2010, linkit Sementit -> Valko.)

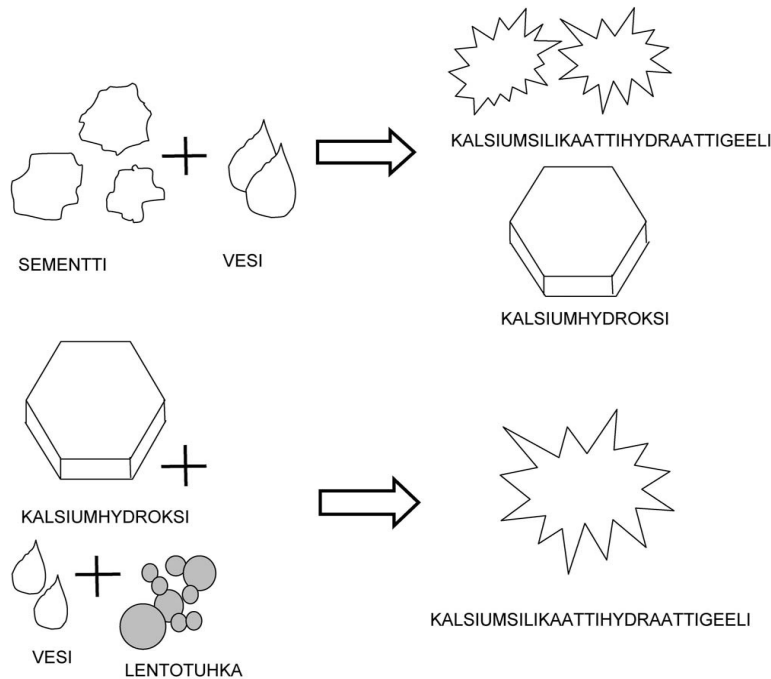
### **2.2.7 Muut sementit**

Reikien ja halkeamien injektointia varten on kehitetty injektointisementtejä. Niille on ominaista erityisen suuri hienous, joka parantaa sementtipastan reaktiivisuus- ja tunkeutuvuusominaisuuksia. Muuraustöihin suunniteltu muuraussementti antaa laastille hyvät työstettävyysominaisuudet. Kovettunut laasti on pakkasenkestävää, ja sen loppulujuus on tarkoituksella huomattavasti alhaisempi kuin muilla sementtituotteilla. Hyvin korkeisiin lämpötiloihin (1 500–1 600 °C) soveltuu aluminaattisementti, jonka käyttökohteena ovat muun muassa tulenkestävät laastit. Se on pääosin kalsiumaluminaatteja sisältävä sementti, jonka reaktiotuotteet eivät ole pysyviä. Siksi sitä ei saa käyttää kantavien rakenteiden valmistukseen. (Betoniteknikan oppikirja 2004. 2005, 49.)

## 2.3 Pozzolaaniset sideaineet

### 2.3.1 Lentotuhka

Lentotuhka on hienoksi jauhetun kivihiilen poltossa voimalaitoksessa syntyvistä savukaasuista erotettava pozzolaani. Jos lentotuhkan hiilipitoisuus on pieni, sen käytöllä voidaan parantaa betonimassan työnettävyyttä ja koossapysyvyyttä. Ongelmana lentotuhkan käytössä on tasalaatuisuuden saavuttaminen, sillä sen hiilipitoisuusmäärät vaihtelevat paljon. Lentotuhkan sisältämä hiili vaikeuttaa betonin huokoistamista. (Betonitekniikan oppikirja 2004. 2005, 59.) Kuvassa 9 on esitetty lentotuhkan toimintaperiaate betonissa.



KUVA 9. Lentotuhkan reaktiot betonissa (Lentotuhkan käyttö betonissa. 2007, 7)

Lentotuhka voi toimia betonissa sekä kiviaineksena (fillerinä) että sideaineena. Sen pozzolaanisen reaktion edellytyksenä on, että vettä ja kalsiumhydroksidia on käytettävissä riittävästi. Lentotuhkan reaktio on sementin reaktiota hitaampi, minkä vuoksi se heikentää betonin varhaislujuutta, mutta parantaa hieman

myöhäisiään lujuutta. Myös hydrataatiolämmönkehitys on alhaisempi. (Betonitekniikan oppikirja 2004. 2005, 59.)

**Pozzosilika** on kivihiilen poltossa syntyvästä lentotuhkasta (kivihiilituhkasta) jalostettua hienoa mikronisoitua jauhetta. Se valmistetaan teollisilla menetelmillä vaahdottaen lentotuhkasta sen sisältämä hiili pois, ja jäljelle jäävä aines jauhatetaan eri käyttötarkoituksiin sopivaksi. Pozzosilika sisältää sementtiin verrattuna runsaasti natrium- ja kaliumoksideoita, jotka kasvattavat betonin alkalipitoisuutta. Pozzosilikan suuresta alkalimäärästä johtuen betoniin voi jäädä ylimääräistä natriumia ja kaliumia, jotka ajan kuluessa voivat karbonatisoitua ja heikentää betonia. (Pikkarainen 2010.)

**Biosilika** on valmistettu niistä voimalaitoksista syntyneestä lentotuhkasta, joissa on poltettu uusiutuvia energianlähteitä, kuten puuta (kuorta, haketta, purua) tai turvetta. Teollisuudessa tämänkaltaista lentotuhkaa kutsutaan puutuhkaksi. Lisäksi joukossa voi olla erilaisia kuitu- ja jätevesilietteitä (bio-, kuitu- ja pastaliete). Biosilikasta on myös poistettu sen kaikista hienoin ainesosa. Puunpoltossa syntyneiden lentotuhkien rikkiyhdisteet ja kloridit ovat betonitekniikan kannalta kriittisimmät kemialliset ominaisuudet. Rikkiyhdisteet voivat kosteissa olosuhteissa reagoida kalsiumhydroksidin kanssa ja aiheuttaa betonissa haitallista paisumista, sementtikiven halkeilua, rapautumista sekä betonin puristuslujuuden heikkenemistä. Kloridit puolestaan voivat nopeuttaa raudoitteiden korroosiota. (Vornanen – Penttala 2008, 72.)

### 2.3.2 Silika

Silika on piiraudan ja alkuaine piin valmistuksessa syntyvä savukaasuista erotettava, erittäin hienojakoinen pozzolaani. Silikan raekoko on  $<1\mu\text{m}$  ja kiintotiheys on luokkaa  $2200\text{ kg/m}^3$ . Alhaisen tilavuuspainon takia silikaa joudutaan jalostamaan käytön helpottamiseksi sintraamalla tai lisäämällä siihen vettä. Silika lisää betonin vedentarvetta, joten sen kanssa tulee aina käyttää vedentarvetta vähentäviä lisäaineita. (Betonitekniikan oppikirja 2004. 2005, 60.)

Hienoudesta ja pallon muotoisuudesta aiheutuen silika saa aikaan betonin hyvän koossapysyvyyden. Silika lisää huomattavasti betonin lujuutta. Se reagoi sementin hydratoituessa syntyneen kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraattia. Silikan hienot partikkelit edesauttavat trikalsiumsilikaatin hydrataatiota. Se parantaa myös betonin kemiallista kestävyyttä, koossapysyvyyttä, tiiviyttä ja vedenpitävyyttä. Varsinkin korkealujuusbetoneissa, joissa sementtimäärä on jo varsin suuri, silika tekee massasta varsin kittimäistä ja vaikeasti työstettävää. Jos silikalla korvataan sementtiä vain sen verran, että lujuus pysyy samana, alenee hydratoitumislämpö hieman, mutta muuten sen lämmökehitys on samaa luokkaa sementin kanssa. (Betoni on monipuolinen rakennusmateriaali. 2006, 3.)

### **2.3.3 Masuunikuonajauhe**

Masuunikuonajauhe on hienoksi jauhettua granuloitua masuunikuonaa. Sitä syntyy, kun rautaa valmistetaan masuuneissa, joissa suletetaan rautamalmia ja koksia. Sulan raudan pinnalle muodostuu kuonaa juoksuttimena käytettävän kalkkikiven ja koksista syntyvän tuhkan sekä rautamalmin aluminaattien ja silikaattien yhdistyessä. Masuunikuona koostuu siten samoista ainesosista kuin Portland-sementti (kalsium-, pii-, alumiini- ja magnesiumoksidit). Sen raekoko on suunnilleen sementin luokkaa tai hieman karkeampi. Kuonajauheen reaktiivisuus riippuu sen raekoosta ja lasimaisuusasteesta. Lasimaisuutensa masuunikuona saa kuonaa jäähdytettäessä nopeasti, jolloin se kiinteytyy lasimaiseen muotoon. Sen jälkeen rakeet jauhetaan samalla tavalla kuin sementtiklinkkeri. (Betonitekniikan oppikirja 2004. 2005, 60 ; Betoni on monipuolinen rakennusmateriaali. 2006, 3.)

Masuunikuonaa voidaan sekoittaa Portland-sementtiin tai lisätä erillisenä aineena betonimassaan. Masuunikuonajauheella on piilevät hydrauliset ominaisuudet. Reagoidakseen se tarvitsee aktivaattorin hajottamaan sen lasimaisen rakenteen. Sopivia aktivaattoreita ovat alkalit ja sulfaatit, joita muodostuu sementin hydratoituessa. Kun reaktio tapahtuu, syntyy



kalsiumpilikaattia, kalsiumaluminaattihydraatteja sekä kalsiumhydroksidia. Masuunikuonan vedentarve on pieni ja se notkistaa betonia. Hydratoitumislämpöä vähentävän ominaisuutensa johdosta sitä käytetään massiivisissa betonivaluissa. Masuunikuonajauheen käyttö parantaa betonin kestävyyttä ja kasvattaa myöhäislujuutta, mutta alentaa varhaislujuutta sekä lisää betonin virumaa ja karbonatisoitumisnopeutta. (Betoni on monipuolinen rakennusmateriaali. 2006, 3.)

## **2.4 Metakaoliini**

Metakaoliini on kaoliinitista polttamalla valmistettu pozzolaaninen aine. Kaoliini on kaoliinittiryhmän yleisin mineraali. Muita ryhmään kuuluvia mineraaleja ovat vähemmän yleinen halloysiitti sekä harvinaisiksi lukeutuvat dicktiitti ja nakriitti. Nämä mineraalit muodostavat yhdessä kaoliinisaven. Lukuun ottamatta halloysiittia, jonka rakenne sisältää muihin verrattuna enemmän vettä, kaikilla kaoliinittiryhmän mineraaleilla on samanlainen kemiallinen koostumus. (Eijärvi – Grehör 2009, 5.)

Kaoliini on yleisnimitys, jolla tarkoitetaan sekä mineraalia kaoliiniitti että maalajia kaoliinisavi. Kaoliini on vaalea tai harmahtava, alumiinisilikaattien heikosti kovettunut ja märkänä muovailtavissa oleva seos, joka on muodostunut pääasiassa edellä mainitusta kaoliinitista. Kaoliini sisältää kaoliinitin lisäksi myös muita hienosuomuisia mineraaleja. Kaoliinitin tunnistaa savimaisesta hajusta, jonka havaitsee parhaiten saveen henkäistäessä. Kaoliinia syntyy muun muassa maasälpäpitoisten kivilajien rapautumisessa. Suomessakin on monia runsaasti kaoliinia sisältäviä rapautumia, jotka ovat syntyneet jopa satoja miljoonia vuosia sitten. Suomen kaoliiniesiintymät sijaitsevat Virtasalmessa, Puolangalla ja Sallassa. Kaoliinia käytetään posliinituotteiden ja tulenkestävien tiilien valmistuksessa sekä täyteaineena ja päällystyspigmenttinä paperiteollisuudessa. Kaoliini on tärkein paperissa käytettävä mineraaliaines, paperiteollisuus käyttää sitä yli miljoona tonnia vuodessa. (Wikipedia. 2007, hakusana Kaoliini ; Grönholm – Alviola – Kinnunen – Kojonen – Kärkkäinen – Mäkitie 2010, 29.)

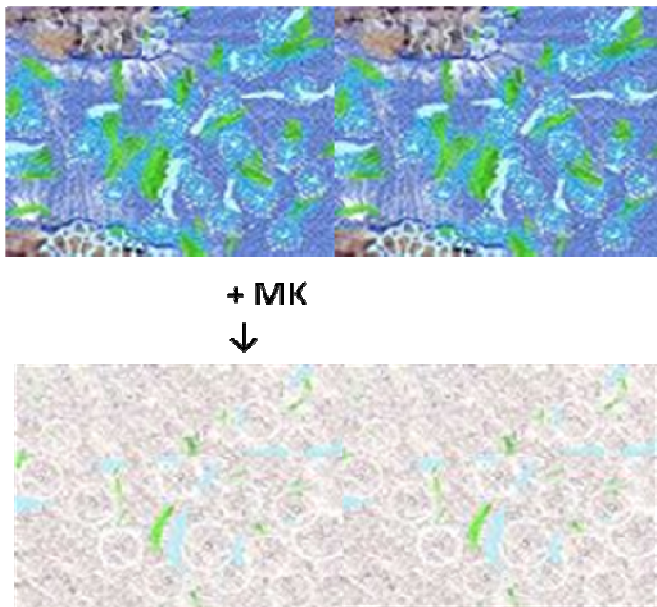
### 2.4.1 Metakaoliinin valmistus

Metakaoliinin valmistuksessa kaoliini louhitaan ja murskataan. Murskatusta kaoliinista erotellaan hiekka, ja sitä jalostetaan poistamalla epäpuhtaudet. Metakaoliiniittia saadaan polttamalla kaoliiniittia 500–800 °C:ssa tarkoin kontrolloiduissa olosuhteissa, jolloin tapahtuu mineraalin aktivoituminen eli syntyy korkean reaktiokyvyn metakaoliini. Polttovaihe jakautuu kahteen merkittävään vaiheeseen. Savimineraaleihin absorboitunut vesi häviää 100–200 °C:ssa, jolloin alkaa kaoliinitin uudelleen järjestäytyminen. Lämpötilan edelleen noustessa 500 °C:een kaoliiniitissa tapahtuu dehydroksylaatio eli veden poistuminen. Tätä vaihetta kutsutaan valmistettavan metakaoliinin aktivointivaiheeksi. Polttouunissa syntynyt metakaoliini jäädytetään ja tarvittaessa jauhetaan hienommaksi. Polton loppulämpötila on riippuvainen kaoliinin laadusta, syntyvästä ja näin ollen myös nostopaikasta. Polttolämpötilan on oltava optimaalinen, ei liian korkea eikä liian matala. Tällä on suuri merkitys myöhempää käyttöä silmällä pitäen. (Eijärvi – Grehör 2009, 5-6 ; Metakaolin. 2007, 5.)

Metakaoliini on teollinen tuote, päinvastoin kuin muut pozzolaanit, jotka ovat teollisten prosessien sivutuotteita. Näin ollen metakaoliinin laatutaso on paremmin hallittavissa verrattuna kuoniin ja tuhkiin. Metakaoliinin tuottaminen on erittäin ympäristöystävällistä verrattuna esimerkiksi Portland-sementin valmistukseen, sillä metakaoliinin valmistuksessa vapautuu ainoastaan polton aikana haihtuva vesi. Valmistuksessa käytettävä polttolämpötila on myös huomattavasti pienempi verrattuna sementin valmistuksen klinkkerin polttoon käytettävän kiertouunin noin 1400 °C:een. Mikäli metakaoliinin valmistuksen yhteydessä käytetään uusiutuvia energianlähteitä, esimerkiksi puuhaketta, hiilidioksidipäästöt laskevat sementin valmistukseen verrattuna noin 10-20 % tasolle. (Eijärvi – Grehör 2009, 5-6.)

## 2.4.2 Metakaoliinin ominaisuudet

Pozzolaanisuuksensa johdosta metakaoliini reagoi betonissa olevan ylimääräisen kalsiumhydroksidin kanssa tiivistäen betonia täyttämällä tyhjän tilan. Se suojaa betonia ympäristön vaikutuksilta sekä tiivistää ja parantaa betonin monia käyttöominaisuuksia. Kuvassa 9 metakaoliini on reagoinut ylimääräisen kalsiumhydroksidin kanssa ja muodostanut lisää geopolymeeriä väliaineeseen. Kyseessä on ns. geopolymeroitumisreaktio, johon perustuvat metakaoliinin ominaisuudet. (Eijärvi – Grehör 2009, 7.)



*KUVA 9. Metakaoliini täyttää betonin tyhjän tilan (Eijärvi – Grehör 2009, 7)*

Metakaoliinin käytöllä voidaan saavuttaa lujempaa ja kestävämpää betonia, parantaa betonin työstedävyttä sekä vähentää kutistumia. Sen avulla voidaan myös vähentää sekä kalkin kulkeutumista betonin pintaan että betonin karbonatisoitumista. (Eijärvi – Grehör 2009, 8.)

### 3 BETONIN TESTAUKSEN KOEOHJELMA

Betonin ominaisuuksia ja sen soveltuvuutta käytännön sovelluksiin voidaan tutkia erilaisilla laboratoriossa tehdyillä kokeilla. Betonin testauksesta on olemassa standardeja, jotka betonille suoritettavien kokeiden on täytettävä, jotta kokeista saatuja tuloksia voidaan pitää luotettavina. Luvussa 3 on selvitetty opinnäytetyöhön kuuluvat kokeet ja niiden suorittaminen.

#### 3.1 Koevariantit

Tähän opinnäytetyöhön laadittiin Morenia Oy:n puolesta koeohjelma, jonka mukaan valmistettiin erilaisia betonimassoja. Lähtökohtana koeohjelman laatimiselle oli löytää mahdollisimman hyvä sementin, lentotuhkajalosteiden ja metakaoliinin muodostama sementtiliima, jossa sementin määrä suhteessa kokonaissideainemäärään pyrittiin saamaan mahdollisimman vähäiseksi. Koeohjelma on esitetty taulukossa 2. Valitun koeohjelman mukaiset reseptit toteutettiin Morenia Oy:ltä saatujen suhteutustietojen mukaisesti.

TAULUKKO 2. Valmistettavien betonimassojen koeohjelma

Nro.	Tunnus	Portland	Pozzosilika (PZ)	Metakaoliini (MK)	Biosilika (BS)	Teräskuona
1	Control	100	0	0	0	0
2	PZ15	85	15	0	0	0
3	PZ25	75	25	0	0	0
4	PZ40	60	40	0	0	0
5	PZ50	50	50	0	0	0
6K	PZ50CA10	50	50	0	0	10
6	PZ50CA10	50	50	0	0	10
7	PZ50CA20	50	50	0	0	20
8	PZ9MK6	85	9	6	0	0
9	PZ18MK12	70	18	12	0	0
10	PZ24MK16	60	24	16	0	0
11	PZ30MK20	50	30	20	0	0
12	PZ30MK20CA10	50	30	20	0	10
13	PZ30MK20CA20	50	30	20	0	20
14	BS25	75	0	0	25	0
15	BS9MK6	85	0	6	9	0
16	BS18MK12	70	0	12	18	0
17	BS24MK16	60	0	16	24	0
18	BS30MK20	50	0	20	30	0

Koeohjelmaan lisättiin alkuperäisestä poiketen massa 6K johtuen massan 6 valmistuksessa epähuomiossa käytetystä kalkista teräskuonan sijaan. Teräskuonan tarkoituksena oli tuottaa betonimassassa lisää kalsiumhydroksidia, johon perustuu myös kalkin, eli kalsiumoksidin toiminta. Koeohjelman mukaiset reseptit on selvitetty taulukossa 3.

*TAULUKKO 3. Testattavien betonimassojen reseptit*

Nro	Sementti [kg/m³]	PZ [kg/m³]	MK [kg/m³]	TK [kg/m³]	0-8mm [kg/m³]	8-16mm [kg/m³]	Vesi [kg/m³]	Vesi- sementti
Ctrl	350	-	-	-	1033	740	167,2	0,48
2	297,5	52,5	-	-	1033	740	167,2	0,48
3	262,5	87,5	-	-	1033	740	167,2	0,48
4	210	140	-	-	1033	740	167,2	0,48
5	175	175	-	-	1033	740	167,2	0,48
6K	175	175	-	35	1033	740	183,92	0,48
6	175	175	-	35	1033	740	183,92	0,48
7	175	175	-	70	1033	740	200,64	0,48
8	297,5	31,5	21	-	1033	740	167,2	0,48
9	245	63	42	-	1033	740	167,2	0,48
10	210	84	56	-	1033	740	167,2	0,48
11	175	105	70	-	1033	740	167,2	0,48
12	175	105	70	35	1033	740	183,92	0,48
13	157	105	88	70	1033	740	200,64	0,48
14	262,5	87,5	-	-	1033	740	167,2	0,48
15	297,5	31,5	21	-	1033	740	167,2	0,48
16	245	63	42	-	1033	740	167,2	0,48
17	210	84	56	-	1033	740	167,2	0,48
18	175	105	70	-	1033	740	167,2	0,48

Aluksi valmistettiin lujuusluokan K35 mukainen vertailusarja, jossa käytettiin sideaineena vain Portland-sementtiä. Koeohjelman toinen osuus koostui Portland-sementin ja pozzosilikan yhteistoiminnasta betonin sideaineena. Vesi-sideaine suhde pidettiin vakiona jokaisessa koevariaatiossa siten, että pozzosilikaa lisättäessä sementin määrää vähennettiin. Testisarjoja tehtiin pozzosilikan määrää asteittain kasvattaen, kunnes puolet sementistä oli korvattu. Myös lisäkalsiumin vaikutusta betonissa kokeiltiin lisäämällä teräskuonaa niihin massoihin, joissa pozzosilika korvasi puolet sementistä. Testin seuraavassa osassa aloitettiin sementin korvaamisen pozzosilikalla ja metakaoliinilla siten, että metakaoliinin massa oli 2/3 pozzosilikan massasta. Koesarja oli muuten edellistä vastaava, mutta edellisessä sarjassa oleva pozzosilikan määrä koostui

nyt pozzosilikan ja metakaoliinin yhteismäärästä. Tämä sarja toistettiin myös käyttäen biosilikkaa pozzosilikan sijaan.

### 3.2 Koekappaleet

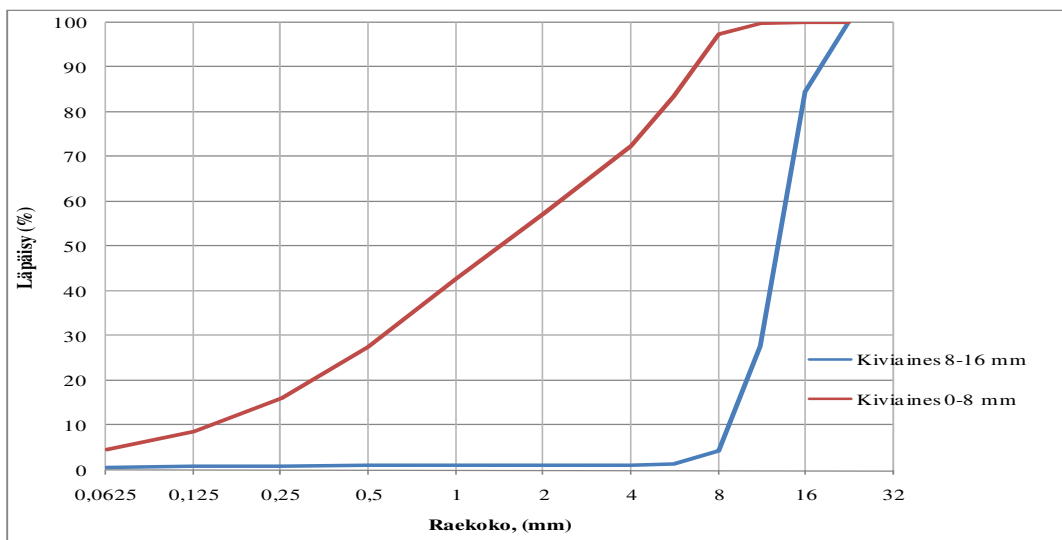
Betonikoekappaleiden valmistus aloitettiin runkoaineiden, sideaineiden, lisäaineiden ja veden punnitsemisella. Runkoaineissa olevaa kosteutta ei huomioitu veden määrässä, sillä käytetty runkoaine oli ollut levitettynä kuivumassa, joten kosteutta oli merkityksettömän vähän.

Reseptien runkoaineina käytettiin Morenia Oy:n toimittamia 0-8 mm:n ja 8-16 mm:n kiviaineksia. Kiviaineksille oli tehty kuivaseulonta standardin SFS-EN 993-1 mukaisesti, samaan aikaan meneillä olevaan opinnäytetyöhön (Nikula 2010) liittyen. Taulukossa 4 on esitetty kuivaseulonnasta saadut tulokset.

TAULUKKO 4. Kiviaineiden raekokojakauma (Nikula 2010)

Runkoaine	%-Osuus	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4
0-8	58,3	2,7	5,0	9,3	16,1	25,0	33,4	42,2	48,7	56,7	58,1	58,3	58,3
8-16	41,7	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	1,8	11,6	35,3	41,7
yht.	100,0	3,0	5,3	9,7	16,5	25,4	33,9	42,7	49,3	58,5	69,8	93,6	100,0

Taulukon perusteella voidaan piirtää kuva 9, jossa on esitetty rakeisuuskäyrät.



KUVA 9. Runkoaineiden rakeisuuskäyrät (Nikula 2010)

Runko- ja sideaineet sekoitettiin keskenään betonimyllyssä, minkä jälkeen lisättiin vesi. Muutaman minuutin sekoituksen jälkeen, kun vesi ja sementti olivat sitoutuneet, massaan lisättiin notkistin ja huokostin. Massaa sekoitettiin vielä muutama minuutti, jotta lisääaineiden vaikutukset saatiin selvästi näkyviin. Betonimassojen työstettävyyksissä oli suuria eroja johtuen sideaineiden eri suhteista kokonaissideainemäärässä. Työstettävyyttä parannettiin käyttämällä Finnsementin valmistamaa VB-Parmix-notkistinta, koska veden määrä pidettiin vakiona koko koesarjan ajan. Riittävän ilmamäärän saavuttamiseksi käytettiin Finnsementin valmistamaa Ilma-Parmix-huokostinta.

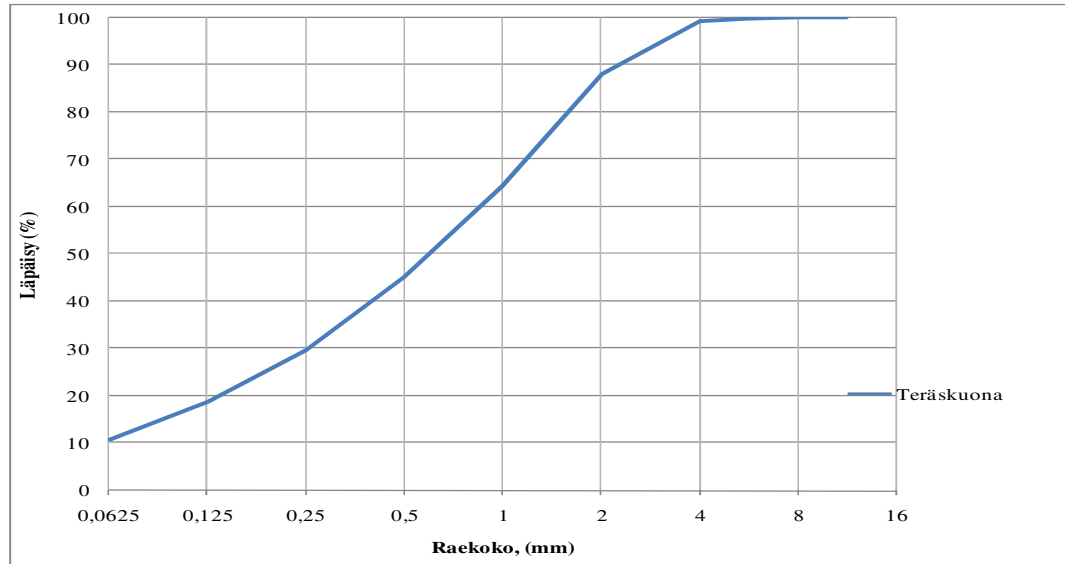
Niissä koesarjoissa joissa haluttiin kokeilla lisäkalkin vaikutusta, käytettiin Rautaruukki Oy:n toimittamaa maanparannustuotteeksi tarkoitettua teräskuonaa. Teräskuona on teräksen valmistuksessa syntynyt sivutuote, joka koostuu kalsiumoksidista (CaO) 40-50 %, piioksidista (SiO<sub>2</sub>) 10-16 %, magnesiumoksidista (MgO) 1-5 %, mangaanioksidista (MnO) 1,1-3,4 % ja piistä (S) 0,1-0,8 %. (Ruukki. 2010, 2.)

Käytetyn teräskuonan raekokojakauma on esitetty taulukossa 5. Teräskuonan rakeisuus on määritelty standardin SFS-EN 933-1 mukaan tehdyn kuivaseulonnan perusteella.

*TAULUKKO 5. Teräskuonan raekokojakauma*

<b>Teräskuona</b>	
Seula (mm)	Läpäisy (%)
11,2	100
8,0	100
5,6	99,8
4,0	99,2
2,0	87,9
1,0	64,2
0,5	45,1
0,25	29,8
0,125	18,7
0,063	10,8

Taulukon 3 perusteella voidaan määritellä rakeisuuskäyrä (kuva 10). Teräskuonan kosteuspitoisuuden merkitys todettiin niin pieneksi, että sitä ei otettu kokeissa huomioon.



KUVA 10. Teräskuonan rakeisuuskäyrä

Jokaisen koe-erän betonimassat valettiin neljään 100x100x100 mm<sup>3</sup>:n kokoiisiin muotteihin (kuva 11). Betonimassan muottiin laittamisen jälkeen muotti nostettiin tärypöydälle, jossa muottia ja massaa tärytettiin noin kuuden sekunnin ajan, jotta se saatiin tiivistettyä. Sen jälkeen betonimassan pinta tasattiin muotin yläreunan tasalle. Valupinta liipattiin lopullisesti noin puolen tunnin kuluttua. Tavoitteena oli saada mahdollisimman sileä ja tasainen tekopinta. Jokainen valmis koekappale laitettiin muovin alle, jotta välttyttäisiin betonin pinnan liian nopealta kuivumiselta, mikä taas vaikuttaisi betonin puristuslujuuksiin. Seuraavana päivänä koekappaleet poistettiin muoteista, ja siirrettiin noin kahdenkymmenen asteen lämpöiseen veteen. Muotit puhdistettiin ja öljyttiin seuraavaa valukertaa varten. Kuvassa 11 on kokeissa käytetty muotti jonka pinta on tasattu.





*KUVA 11. Koekappaleen tasoitettu pinta*

Kaikki koekappaleet säilytettiin vedessä koko lujuudenkehityksen ajan aina puristuslujuusmittaukseen asti. Vedessä säilyttämisen tarkoituksena oli saada kaikille koekappaleille mahdollisimman samanlaiset olosuhteet sekä välttää koekappaleiden liian nopea kuivuminen.

Jokaisesta koemassasta laadittiin betonimassatutkimus-asiakirja, johon merkittiin kaikki tiedot kustakin massasta, kuten runkoaine-, sideaine-, lisäaine- ja vesimäärä, sekä tuoreen betonin kokeista saadut tulokset, kuten lämpötila, painuma, tiheys ja ilmamäärä. Koekappaleisiin merkittiin vedenpitävällä liidulla valmistuspäivämäärä ja tunnus myöhempää testausta varten.

### **3.3 Kokeet**

#### **3.3.1 Tuoreen betonin kokeet**

Tuoreelle betonille suoritettavien kokeiden avulla voidaan selvittää betonimassan ominaisuuksia ja käyttäytymistä valutilanteissa ja myös myöhemmässä vaiheessa. Tässä opinnäytetyössä tuoreelle betonille tehtävät kokeet olivat painuman mittaus sekä ilmamäärän määrittäminen.

Betonin käyttäytymistä valutilanteessa voidaan selvittää mittaamalla betonin notkeus siihen tarkoitetulla painumakokeella. Notkeuskoe suoritettiin standardin SFS-EN 12350-2 luokka S2:n mukaan, jonka painumarajat ovat 50–90 mm. Painuman mittaus suoritettiin laittamalla betonimassaa kokeen suorittamiseen tarkoitetun kartion muotoiseen astiaan. Massaa lisättiin kolmessa vaiheessa siten, että jokaisen lisäämisen jälkeen massa tiivistettiin lyömällä siihen 25 iskua tarkoitukseen tehdyllä iskusauvalla. Viimeisen massan lisäämisen jälkeen betonin pinta tasoitettiin kartion yläreunan tasalle. Tämän jälkeen kartio nostettiin pois ja massasta mitattiin painuma.

Ilmamäärän eli huokoisuuden mittaamisen tarkoituksena on selvittää betonissa olevan ilman määrä, mikä vaikuttaa oleellisesti kovettuneen betonin pakkasenkestävyyteen. Betonimassan ilmapitoisuus määritettiin standardin SFS-EN 12350-7 mukaisesti. Betonimassa tiivistettiin ilmamäärän mittaukseen tarkoitettuun astiaan (kuva 12) kahdessa vaiheessa. Aluksi astia laitettiin puolilleen betonimassaa, minkä jälkeen massaa tiivistettiin sauvatäryttimellä. Tämän jälkeen astia täytettiin loppuun ja massa tiivistettiin toisen kerran, minkä jälkeen pinta tasoitettiin mahdollisimman tasaiseksi astian yläreunan tasalle.



KUVA 12. Ilmamäärän mittausastia

Tasoituksen jälkeen astian päälle laitettiin ilmamäärämittarin kansi, joka lukittiin tiiviisti astiaan kiinni. Kannen ja betonimassan välinen tila täytettiin vedellä ja astian ilmaventtiilit suljettiin. Kannessa olevan erillisen pumpun avulla säiliöön pumpattiin ilmaa, kunnes kannen mittarin (kuva 13) osoitin oli punaisen alkupainemerkin kohdalla. Säiliössä oleva ilma päästettiin tunkeutumaan betoniin ns. peukalopainikkeen avulla, minkä jälkeen mittarista voitiin lukea betonin ilmamäärä prosentteina. Haluttu ilmamäärä oli 4–8 %. Mikäli notkeus- ja ilmamäärämittausten tulokset eivät olleet sallituissa rajoissa, massaan lisättiin tarpeen mukaan notkistinta tai huokostinta.



KUVA 13. Ilmamäärän mittauslaitteen mittari

### 3.3.2 Kovettuneen betonin kokeet

Tässä opinnäytetyössä kovettuneen betonin kokeet keskittyivät ainoastaan koekappaleiden puristuslujuuksien mittaamiseen. Jokaisesta koe-erästä oli tehty neljä samanlaista koekappaletta, joille tehtiin puristuslujuuden mittaukset siten, että ensimmäinen koekappale testattiin yhden vuorokauden ikäisenä, toinen koekappale kolmen vuorokauden ikäisenä sekä kolmas koekappale 28 vuorokauden ikäisenä. Neljäs koekappale oli varakappale, jota säilytettiin siltä varalta, että joku puristuslujuuden mittaus jostakin syystä epäonnistuisi.

Koekappaleiden puristuslujuudet määriteltiin standardin SFS-EN 12390-3 mukaisesti. Puristuslujuus mitattiin siihen tarkoitukseen erikoisvalmistetulla Tonipro 4000 -betonipuristimella (kuva 14). Puristuskone täyttää sille asetetun EN 2390-4 standardin vaatimukset. Laite kalibroidaan kerran vuodessa ja kalibroinnista vastaa Valtion teknillinen tutkimuskeskus.





KUVA 14. Betonipuristin Tonipro 4000

Jokaiselle koe-erälle täytettiin testaustilauslomake, johon merkittiin kunkin koekappaleen valmistuspäivämäärä ja koetusikä. Ennen puristuslujuuden mittausta koekappale punnittiin ja mitattiin, jotta saatiin selville koekappaleen tiheys sekä puristuspinta-ala. Pinta-alaa tarvittiin myöhemmin muutettaessa koneen antama puristusvoima ( $\text{MN/m}^2$ ) koekappaleen puristuslujuudeksi ( $\text{MPa}$ ). Puristuslujuus saadaan laskettua kaavalla 2, ja kovettuneen betonin tiheys kaavalla 3.

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

KAAVA 2

$f_c$  = puristuslujuus

$F$  = suurin kuorma murtohetkellä (N)

$A_c$  = kuormitetun alan pinta-ala ( $\text{mm}^2$ )

$$D = \frac{m}{V}$$

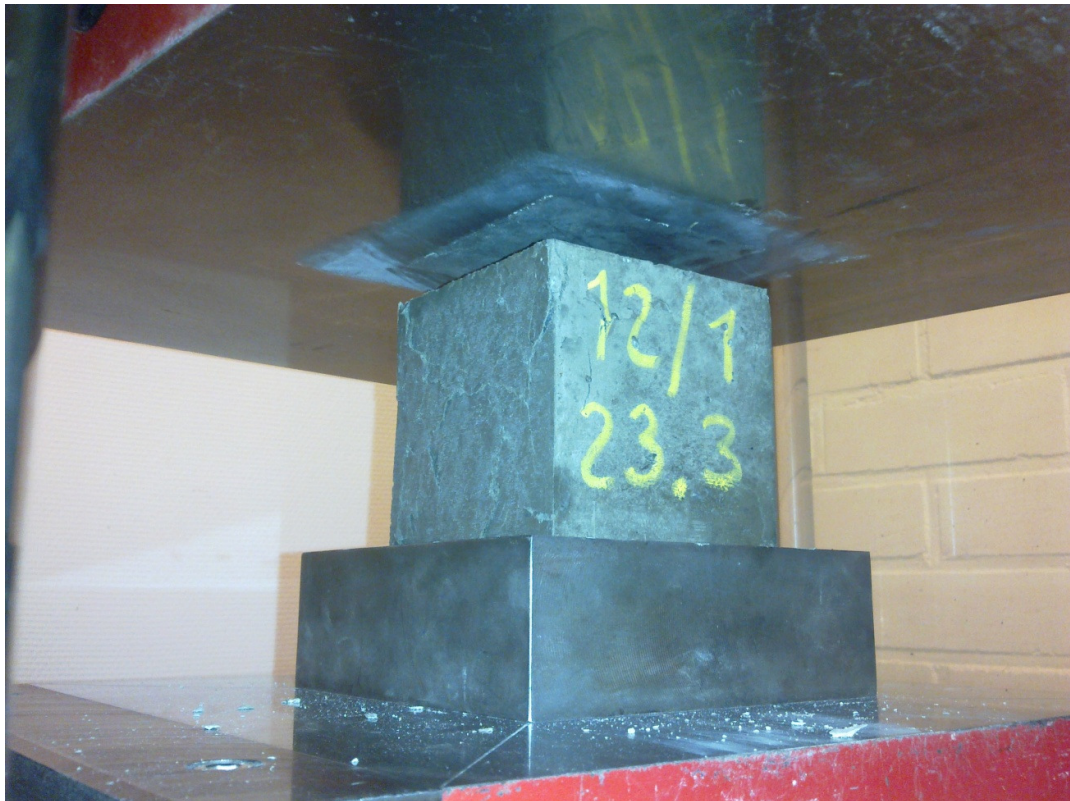
KAAVA 3

D = kovettuneen betonin tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

m = koekappaleen massa

V = koekappaleen tilavuus

Koekappaleiden tiheys laskettiin kaavasta 3 standardin SFS-EN 12390-7 mukaan. Koekappaleen pinnat hierrettiin hiomakivellä, reunat ja nurkat tasoitettiin mahdollisista valupurseista. Näin koekappaleesta saatiin mitattua tarkat mitat ja koekappale sai mahdollisimman tasaisen kosketuksen betonipuristimen puristuspintoihin (kuva 15).



KUVA 15. Puristuskokeessa haljennut koekappale

## 4 TUOREEN JA KOVETTUNEEN BETONIN KOETULOKSET

Betonin puristuslujuus ilmoitetaan standardin mukaan sen 28 vuorokauden iässä. Tämän johdosta kaikkien koevariaatioiden suorittaminen ja halutun 28 vuorokauden puristuslujuuden mittaaminen vaati usean kuukauden työn. Tuoreen betonin koetulokset on esitetty taulukossa 6, ja koekappaleille tehdyistä kokeista saadut tulokset ovat taulukossa 7.

TAULUKKO 6. Tuoreen betonin koetuloksia.

Massa nro.	Lämpötila [C]	Notkistimen massa / sideaineiden massa [%]	Painuma [mm]	Tiheys [kg/m³]	Huokostimen massa / sideaineiden massa [%]	Ilmamäärä [%]
1	20,9	1,00	60	22,97	1,00	6,3
2	21,3	1,90	55	23,09	1,00	5,8
3	20,3	1,25	54	22,83	1,16	5,6
4	23,4	1,44	66	22,68	1,00	6,3
5	21,8	1,00	50	22,94	1,00	4,7
6K	22,2	0,50	55	22,80	1,00	4,7
6	20,4	0,50	80	22,70	1,00	5,6
7	19,9	0,00	80	22,84	0,95	4,0
8	22,1	1,56	54	22,88	1,00	5,8
9	23,6	1,76	57	22,74	1,00	6,0
10	24,8	1,71	50	22,95	0,95	4,8
11	24,2	2,62	49	23,08	0,95	4,6
12	23,3	1,79	80	22,47	0,95	6,0
13	22,5	1,00	50	22,82	0,95	4,0
14	22,7	1,55	70	23,11	1,52	4,5
15	23,5	1,60	87	22,68	1,05	6,5
16	24,8	1,79	51	23,00	1,05	5,2
17	27,6	2,21	55	23,04	1,05	4,8
18	27,9	2,93	58	23,47	1,56	3,6

Betonimassoihin 6, 6K ja 7 käytetyn notkistimen vähäinen määrä verrattuna muihin massoihin on hyvin pieni. Tämä johtuu massoissa käytetyn sideainemäärän kasvusta teräskuonan lisäyksestä johtuen. Vesi-sideainesuhde

haluttiin pitää vakiona kaikissa koe-erissä, joten massoissa 6, 6K ja 7 on käytetty enemmän vettä.

TAULUKKO 7. Koetulokset 100 mm:n kuutioilla

Esisarja A) POZZOSILIKA (PZ)					Tiheydet [kg/m³]				Lujuudet [MPa]			
	Portland	PZ	MK	TK	1 vrk	3vrk	28vrk	*90vrk	1 vrk	3vrk	28vrk	*90vrk
1 Control	100	0	0	0	2290	2280	2330	2310	8	22	36	53
2 PZ 15	85	15	0	0	2300	2330	2330		9,5	26,5	43,5	
3 PZ 25*	75	25	0	0	2310	2320	2340		6	19	42,5	
4 PZ 40	60	40	0	0	2300	2310	2330		3,5	12,5	34,5	
5 PZ 50	50	50	0	0	2270	2320	2340		-	8	31,5	
6K *PZ 50CA10	50	50	0	10	2270	2300	2320		1,5	7	26	
6 PZ 50CA10	50	50	0	10	2290	2320	2300		3	8,5	23,5	
7 PZ 50CA20	50	50	0	20	2310	2320	2320		2,5	7,5	22	
*PZ 50CA10					Teräskuonan (TK) sijasta käytetty kalkkia							

Esisarja B) POZZOSILIKA (PZ) + METAKAOLIINI (MK)												
8 PZ 9MK6	85	9	6	0	2300	2290	2330		6,5	21	40,5	
9 PZ 18MK12	70	18	12	0	2290	2300	2310		8,5	19	41,5	
10 PZ 24MK16	60	24	16	0	2340	2350	2310		7,5	17	36	
11 PZ 30MK20	50	30	20	0	2300	2330	2340		6	14,5	37	
12 PZ 30MK20CA10	50	30	20	10	2250	2290	2300		4	10	28	
13 PZ 30MK20CA20	50	30	20	20	2300	2300	2320		2,5	8	23,5	
14 Biosilika25	75	25	0	0	2340	2330	2350		11	24	44,5	

Esisarja C) BIOSILIKA (BS) + METAKAOLIINI (MK)												
	Portland	BS	MK		1vrk	3vrk	28vrk		1vrk	3vrk	28vrk	
15 BS9MK6	85	9	6		2290	2290	2350		12,5	25	42,5	
16 BS18MK12	70	18	12		2320	2340	2330		10,5	22	43	
17 BS24MK16	60	24	16		2310	2320	2310		8	17,5	39	
18 BS30MK20	50	30	20		2340	2340	2360		7	13	34	



## 5 KOETULOSTEN KÄSITTELY JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Koetulosten käsittely perustuu kirjallisuudesta saatuun tietoon betonin ominaisuuksista. Koeohjelman betonimassoja, joissa on käytetty metakaoliinia ja niistä saatuja koekappaleiden arvoja on verrattu ensimmäiseksi valmistettuun, niin sanottuun vertailumassan arvoihin, jossa ei ole käytetty metakaoliinia.

Taulukossa 5 esitetyistä tuloksista havaitaan betonimassan suuria lämpötilan vaihteluita. Massan lämpötilaan vaikuttaa valmistamiseen käytetyn veden lämpötila, jonka nousu lyhentää betonin sitoutumisaikaa. Tämän opinäytetyön kokeiden betonin valmistuksessa käytettyä veden lämpötilaa ei mitattu, joten lämpötilanvaihteluiden syytä ei voida varmasti todeta. Betonin kovettumisreaktio on eksoterminen, eli lämpöä tuottava reaktio, joten esimerkiksi koeohjelman massojen 10 ja 11 korkeista lämpötiloista voidaan havaita, että metakaoliini lisää huomattavasti reaktioita betonissa verrattuna pelkän pozzosilikan vastaaviin (massat 4 ja 5) reaktioihin. Erityisesti massassa 5, jonka lämpötila on pienentynyt selvästi, todetaan että pozzosilikan määrälle ei riitä sementin hydratoitumisreaktion tuottama kalsiumhydroksidi. Sementin vähäisestä määrästä johtuen reaktiot, ja sen kautta reaktiolämpö ja lujuuden kehitys jäivät vähäiseksi.

Metakaoliinin parantava vaikutus voidaan havaita jopa vielä selvemmin verrattaessa massoja 4 ja 5 massojen 17 ja 18 kanssa. Massoissa 17 ja 18 sementtiä korvattiin metakaoliinilla ja biosilikalla. Biosilikassa on oletettavasti paljon klorideja, jotka toimivat kiihdyttimenä betonimassassa. Koeohjelman massojen lämpötiloista ei voida kuitenkaan tehdä luotettavia johtopäätöksiä, koska massalle haettiin oikeaa notkeutta ja huokoisuutta, jonka takia lisäaineita jouduttiin lisäämään useammankin kerran ja sekoittamaan massaa uudelleen.

Betonin notkeuskokeista saaduista tuloksista voidaan päätellä, että sementin korvaaminen metakaoliinilla ja lentotuhkilla lisää notkistimen käytön tarvetta.

Vaikutuksen huomaa jo ensimmäisen ja toisen massojen painumien vertaamisella. Massaan 1 on laitettu 1 % notkistinta sideaineiden massasta. Massaan 2 taas on laitettu lähes 2 %, eli melkein kaksinkertainen määrä, ja painuma on jäänyt hiukan pienemmäksi. Taulukossa 8 on havainnollistettu notkistimen tehokkuutta, jonka yksikkönä on painuman suhde notkistimen ja sideaineiden massojen suhteeseen.

*TAULUKKO 8. Notkistimen tehokkuus*

Massa nro	Sementti	PZ	BS	MK	N/A [%]	Painuma [mm]	Painuma / (N/A) [mm/%]
1	100/100	-	-	-	1,00	60	60,0
4	60/100	40/100	-	-	1,44	66	45,8
8	85/100	9/100	-	6/100	1,56	54	34,6
11	50/100	30/100	-	20/100	2,62	49	18,7
16	70/100	-	18/100	12/100	1,79	51	28,5
18	50/100	-	30/100	20/100	2,93	58	19,8
Selosteet:		PZ	Pozzosilika				
		BS	Biosilika				
		MK	Metakaoliini				
		N	Notkistimen massa				
		A	Sideaineiden massa				

Käytetty huokostimen määrä vaikuttaa myös betonimassan notkeuteen, joten taulukossa esitetyt massat 1, 4, 8 ja 11 ovat vertailukelpoisimmat. Massojen 16 ja 18 perusteella metakaoliini heikentää notkistimen tehokkuutta myös biosilikalla toteutetussa koesarjassa.

Taulukosta voidaan havaita, miten notkistimen tehokkuus laskee sementin määrän vähentyessä, ja edelleen tehokkuuden laskua havaitaan käytettäessä metakaoliinia. Massassa 11, missä sementtiä on korvattu puolet, notkistimen määrä verrattuna vertailumassaan lähestyy kolminkertaista. Silti painumakokeen tulos antaa pienemmän arvon. Massojen 11 ja 18 vertailu tukee havaintoa, sillä niissä sementtiä on korvattu yhtä paljon, metakaoliinia on saman verran, ja notkistimen tehokkuusluku on likimain sama. Osittain notkistimen tarvetta voidaan selittää sillä, että lentotuhka ja metakaoliini hienoutensa takia lisäävät betonin vedentarvetta.

Huomiona massojen 6K, 6 ja 7 vähäiseen notkistimen tarpeeseen, että se johtuu suurilta osin valmistamiseen käytetyn veden määrästä. Teräskuonan käyttö kasvatti sideainemäärää, joten vesi-sideainesuhteen pitämiseksi samana veden määrää lisättiin. Veden määrän lisäys oli kuitenkin tarpeetonta, koska teräskuonalla on pieni vedentarve, joten se ei oleellisesti vaikuta massan notkeuteen. Jos sementtiä olisi vähennetty ja korvattu sitä teräskuonalla, se olisi vain tehnyt massasta notkeampaa.

Sementin korvaamisen vaikutusta huokostimen tarpeeseen näillä kokeilla on vaikea tutkia luotettavasti, sillä betonimassan notkeus vaikuttaa omalta osaltaan sen ilmamäärään. Eri notkistinmäärien käytön ja sideaineiden suhteiden takia jokaisella massalla on erilainen notkeus, joten ne eivät ole vertailukelpoisia huokostimen tehokkuutta tarkasteltaessa. Suuntaa antavia tuloksia muutamista massoista on esitetty taulukossa 9, jossa huokostimen tehokkuutta on havainnollistettu ilmamäärän suhteella huokostimen ja sideaineiden suhteeseen.

*TAULUKKO 9. Huokostimen tehokkuus*

Massa nro	Sementti	PZ	BS	MK	H/A [%]	Ilmamäärä [%]	Ilmamäärä / (H/A) [%/%]
1	100/100	-	-	-	1,00	6,3	6,3
4	60/100	40/100	-	-	1,00	6,3	6,3
8	85/100	9/100	-	6/100	1,00	5,8	5,8
11	50/100	30/100	-	20/100	0,95	4,6	4,8
16	70/100	-	18/100	12/100	1,52	5,2	3,4
18	50/100	-	30/100	20/100	1,56	3,6	2,3
Selosteet:		PZ	Pozzosilika				
		BS	Biosilika				
		MK	Metakaoliini				
		H	Huokostimen massa				
		A	Sideaineiden massa				

Taulukossa 9 esitetystä tehokkuusluvusta voidaan päätellä, että sementin korvaaminen pozzosilikalla ei laske huokostimen tehokkuutta lainkaan. Kun pozzosilikan lisäksi korvaajana käytetään metakaoliinia, tehokkuusluku laskee huomattavasti. Edelleen metakaoliinin määrän lisääntyessä huokostimen käytön

tarve lisääntyy, koska metakaoliini reagoiessaan tiivistää betonia täyttäen tyhjää tilaa. Tästä voidaan päätellä, että metakaoliinia lisättäessä tulee huokostimen määrää myös kasvattaa, jotta saavutetaan haluttu ilmamäärä. Osittain huokostimen tehokkuuden laskua voidaan selittää myös sillä, että käytetty huokostin on tarkoitettu normaaleihin betoneihin ja kun hydrataatioon osallistuvan sementin määrä pienenee.

Koekappaleet valmistettiin 100x100x100 mm<sup>3</sup>:n kokoisissa muoteissa. Tämän johdosta saadut tulokset muutettiin vastaamaan 150x150x150 mm<sup>3</sup>:n kokoisten koekappaleiden puristuslujuuksia (taulukko 10). 100 mm:n koekappaleen lujuus muutetaan vastaamaan 150 mm:n koekuutioita interpoloimalla arvot lineaarisesti standardissa SFS-EN 206-1 esitetyn taulukon mukaan. Puristuslujuus ilmoitetaan 0,5 MPa:n tarkkuudella. (Betoninormit 2004. 2004, 103.)

TAULUKKO 10. Koetulokset muunnettuina 150 mm:n kuutiolujuuksiin

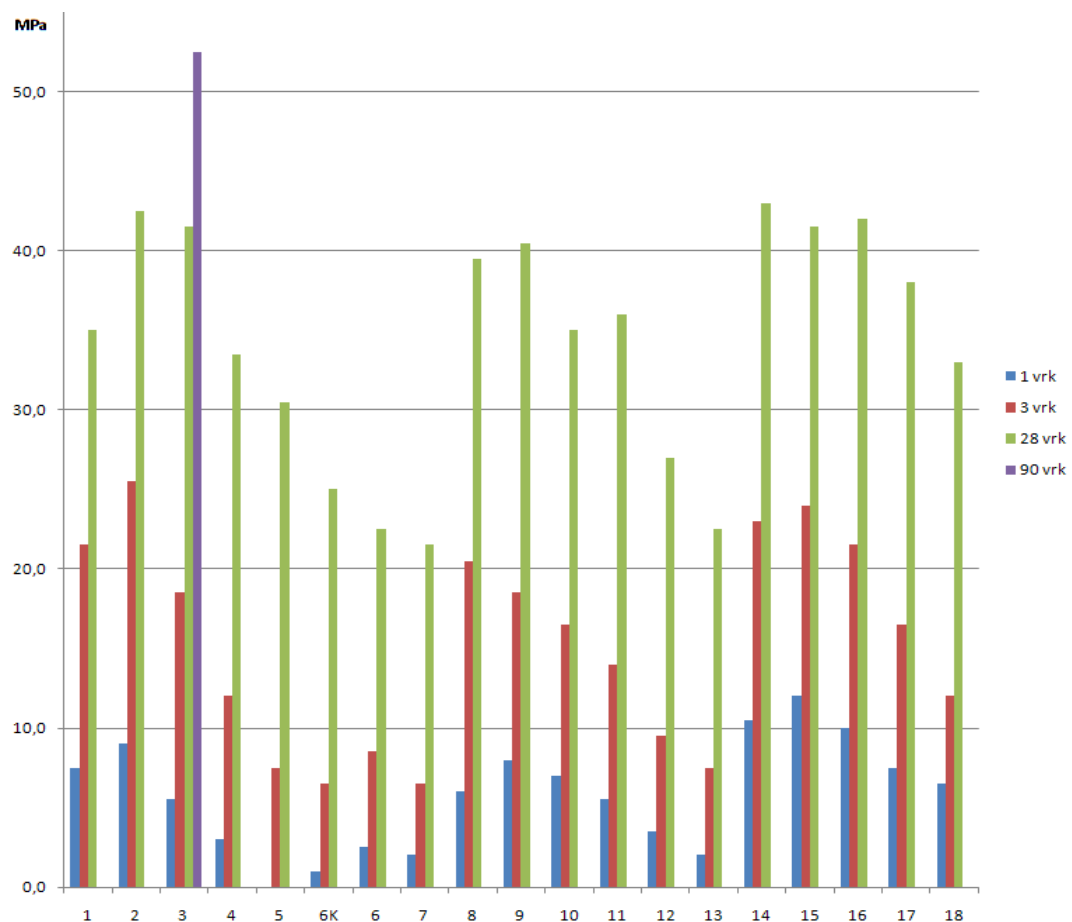
Eisarija A) POZZOSILIKA (PZ)					Tiheydet [kg/m <sup>3</sup> ]				Lujuudet [MPa]			
	Portland	PZ	MK	TK	1 vrk	3vrk	28vrk	*90vrk	1 vrk	3vrk	28vrk	*90vrk
1 Control	100	0	0	0	2290	2280	2330		7,5	21,5	35,0	
2 PZ15	85	15	0	0	2300	2330	2330		9,0	25,5	42,5	
3 PZ25	75	25	0	0	2310	2320	2340	2310	5,5	18,5	41,5	51,5
4 PZ40	60	40	0	0	2300	2310	2330		3,0	12,0	33,5	
5 PZ50	50	50	0	0	2270	2320	2340		-	7,5	30,5	
6K PZ50CA10	50	50	0	10	2270	2300	2320		1,0	6,5	25,0	
6 PZ50TK10	50	50	0	10	2290	2320	2300		2,5	8,5	22,5	
7 PZ50TK20	50	50	0	20	2310	2320	2320		2,0	6,5	21,5	

Eisarija B) POZZOSILIKA (PZ) + METAKAOLIINI (MK)												
	Portland	PZ	MK	TK	1 vrk	3vrk	28vrk		1 vrk	3vrk	28vrk	
8 PZ9MK6	85	9	6	0	2300	2290	2330		6,0	20,5	39,5	
9 PZ18MK12	70	18	12	0	2290	2300	2310		8,0	18,5	40,5	
10 PZ24MK16	60	24	16	0	2340	2350	2310		7,0	16,5	35,0	
11 PZ30MK20	50	30	20	0	2300	2330	2340		5,5	14,0	36,0	
12 PZ30MK20TK10	50	30	20	10	2250	2290	2300		3,5	9,5	27,0	
13 PZ30MK20TK20	50	30	20	20	2300	2300	2320		2,0	7,5	22,5	
14 BS25	75	25	0	0	2340	2330	2350		10,5	23,0	43,0	

Eisarija C) BIOSILIKA (BS) + METAKAOLIINI (MK)												
	Portland	BS	MK		1 vrk	3vrk	28vrk		1 vrk	3vrk	28vrk	
15 BS9MK6	85	9	6		2290	2290	2350		12,0	24,0	41,5	
16 BS18MK12	70	18	12		2320	2340	2330		10,0	21,5	42,0	
17 BS24MK16	60	24	16		2310	2320	2310		7,5	16,5	38,0	
18 BS30MK20	50	30	20		2340	2340	2360		6,5	12,0	33,0	

Koesarjan ensimmäisessä osassa selvitettiin sementin ja pozzosilikan yhteiskäytön vaikutus lujuuden kehitykseen. Pozzosilikassa olevat

alumiinisilikaatit reagoivat kalsiumhydroksidin kanssa veden läsnä ollessa muodostaen kalsiumsilikaattia ja aluminaattihydraatteja, kuten Portland-sementti reagoi vedessä. Reaktioon tarvittavaa kalsiumhydroksidia muodostuu sementin hydratoituessa, joten pozzosilika ei juuri vaikuta betonin varhaislujuuteen. Se vaikuttaa kuitenkin huomattavasti myöhempään lujuuteen. Alkuvaiheen lujuuden kehitys syntyy sementissä olevien trikalsiumsilikaattien muodostamista kalsiumsilikaattihydraateista. Sementin määrän laskiessa alenee myös betonin alkulujuus. Lukuunottamatta massaa 2, koekappaleiden alkulujuudet jäivät vertailumassan lujuuksia pienemmiksi sitä mukaan, mitä enemmän sementtiä korvataan. Lujuudenkehitys jatkuu kuitenkin pitkään 28 vuorokauden jälkeenkin, minkä voi havaita massan 3 lujuudesta 90 vuorokauden jälkeen. Massoissa 4–7 hydratoitumiskykyistä sementtiä on jo liian vähän, joten pozzosilikan kanssa reagoivaa kalsiumhydroksia ei muodostu tarpeeksi.



KUVA 16. Puristuslujuustulokset pylväsdiagrammissa

Tulosten mukaan metakaoliinin ja pozzosilikan yhteisvaikutuksella voidaan sementtiä korvata hieman suurempi määrä verrattuna pelkästään pozzosilikan vaikutukseen. Pozzosilika sisältää runsaasti alkaleja, joita voi jäädä betoniin reagoimattomina. Nämä voivat myöhemmin aiheuttaa alkalireaktioita, joilla on pyrkimys rikkoa betonirakennetta. Kun metakaoliinia lisätään betonimassaan, se vie hydratoitumisreaktion loppuun muodostaen lisää geopolymeeriä väliaineeseen ja reagoiden pozzosilikan sisältämien alkalien kanssa estäen näin niiden haitalliset reaktiot. Esimerkiksi verrattaessa massoja 4 ja 10 huomataan metakaoliinin parantavan tässä tapauksessa myös alkulujuutta. Massan 10 ensimmäisen vuorokauden lujuus on yli kaksinkertainen massan 4 vastaavasta lujuudesta. Kolmen vuorokauden lujuudessa ero on pienentynyt, ja 28 vuorokauden lujuudessa arvot ovat lähes samat. Yleisesti ei voida kuitenkaan päätellä metakaoliinin parantavan alkulujuutta normaaliin Portland-sementistä valmistettuun betoniin verrattuna. Vertailumassaa vastaa lujuuksiltaan lähimmin massa 10, jossa sementtiä on korvattu jo 40 %. Massan 11, jossa sementtiä on korvattu 50 %, loppulujuus on vertailumassaan nähden hieman suurempi, mutta alkulujuus jää kuitenkin pienemmäksi.

Biosilikan käyttö pozzosilikan sijaan parantaa hieman koekappaleiden lujuuksia. Mitä enemmän sementtiä korvataan, sen pienemmäksi lujuuserot tulevat. Massan 8 ensimmäisen vuorokauden lujuus on 6,0 MPa ja vastaavan biosilikaa sisältävän massan 15 ensimmäisen vuorokauden lujuus on 12,0 MPa. Asteittain biosilikan ja metakaoliinin määrää lisättäessä ero pienenee massojen 10 ja 17 väliseen 6 %:n eroon. Massat 14–17 ovat 28 vuorokauden lujuuksiltaan huomattavasti suurempia kuin K35 –lujuusluokan vertailumassan vastaava lujuus. Biosilikan sisältämät kloridit, jotka toimivat kiihdyttimenä betonissa, saattavat osittain vaikuttaa koekappaleiden alkulujuuksien hyviin kehittymisiin. Kloridit nopeuttavat myös raudotteiden korroosiota ja lyhentävät näin betonin käyttöikää. Biosilikan käytössä pitää ottaa huomioon, että kloridipitoisuudet saattavat olla yli kymmenkertaisia kivihiilituhkan pitoisuuksiin verrattuna (Vornanen – Penttala 2008). Betoninormien 2004 mukaan betonin suurin sallittu kloridipitoisuus on 0,2 % sementin ja seosaineiden määrästä (raudoitetulla betonilla).

Teräskuonan käyttö lisäkalkin tuojana ei saanut aikaan haluttuja vaikutuksia lujuudenkehitykseen. Koekappaleiden alku- sekä loppulujuudet jäivät noin 26 - 30 % massan 5 vastaavista lujuuksista, jossa sementti-pozzosiilika suhde on sama. Teräskuonan tehottomuus saattoi myös johtua sementin pienestä osuudesta niissä massoissa, joissa teräskuonaa käytettiin. Myöskään massassa 6K käytetty kalkki ei oleellisesti parantanut koekappaleiden lujuutta. Tuloksista päätellen teräskuonan käyttö ei ole kannattavaa, varsinkaan kun teräskuona ei itsessään tuo betoniin lisää lujuutta. Sen tarkoituksena on metakaoliinin tavoin tiivistää betonia ja toisaalta myös parantaa metakaoliinin ominaisuuksia tuottamalla lisää kalsiumhydroksidia.

Sekä biosiilikan että pozzosiilikan tapauksessa ne massat, joissa sideaineesta on sementtiä 70 % ja metakaoliinia 12 %, näyttäisivät tulosten perusteella toimivan parhaiten. Alkulujuudet ovat hieman parempia kuin vertailusarjan vastaavat lujuudet, mutta 28 vuorokauden lujuudet ovat selvästi parempia. Nämä massat ovat vertailukelpoisia keskenään myös lisäaineiden käytön suhteen, sillä kummassakin ovat lisäaineiden määrät ja niiden tehokkuudet lähestulkoon sama. Kuitenkin jopa 50 %:n korvausasteella päästään kummassakin koesarjassa vertailubetonin lujuuteen 28 vuorokauden iässä, lukuunottamatta massoja, joissa käytettiin teräskuonaa. Heikkoutena näyttää olevan sitä hitaampi alkujuuuden kehittyminen, mitä suurempi on sementin korvausaste. Tämä ei kuitenkaan ole suuri ongelma vielä ensimmäisenä vuorokautena, sillä vertailukoekappaleen ensimmäisen vuorokauden lujuus oli 8 MPa, ja vastaavat arvot massojen 11 ja 18 koekappaleilla ovat 6 MPa ja 7 MPa. Kolmen vuorokauden lujuuksissa vertailukoekappaleen lujuus on kuitenkin lähes kaksinkertainen.

Tämän opinnäytetyön kokeissa sementtinä on käytetty yleissementtiä eli Portland-seossementtiä (CEMII/ A-M), jossa klinkkeripitoisuus on 80–94 %, ja loput 6–20 % ovat muita pääosa-aineita. Valmistettavan sementin tulee täyttää standardin SFS-EN 197-1 vaatimukset koostumusten suhteen, mutta standardi ei edellytä erittelemään sementin pääosa-aineiden pitoisuuksia. Tästä johtuen on mahdotonta tietää tarkasti sementin kemiallista koostumusta, sillä valmistetuissa massoissa voi näin ollen olla esimerkiksi lentotuhkaa

huomattavasti enemmän kuin on oletettu. Kun tutkimuksissa vähennettiin sementtiä ja korvattiin sitä lentotuhkajalosteilla ja metakaoliinilla, tavallaan valmistettiin käytetystä Portland-seossementistä (CEM II) Seossementtiä (CEM V). Sen pääosa-aineet koostuvat lentotuhkista ja luonnonpozzolaaneista, joten tutkimuksissa käytetty sideaine vastaa hyvin lähelle Seossementtiä.

Myös metakaoliinin valmistuksessa syntyy eroja eri metakaoliini-erille. Metakaoliinin laatu, nostopaikka ja jopa syntytapa vaikuttavat sen koostumukseen, ja siksi olisi hyvä löytää valmistusmenetelmä, jolla saataisiin mahdollisimman vakiolaatuista metakaoliinia. Tämän opinnäytetyön betonierien valmistuksessa on käytetty samasta paikasta nostettua ja samaan hienousasteeseen mikronisoitua metakaoliinia. Myös pozzo- ja biosilika ovat samasta valmistuserästä, ja käytetty sementti on otettu koko koesarjan ajan samasta säkistä. Näin ollen tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia.

Tuloksista voidaan todeta, että metakaoliinilla pystytään lentotuhkajalosteiden kanssa korvaamaan osa sementistä. Toisaalta tarkoituksena oli etsiä mahdollisimman suurta korvausastetta, jolla päästään lujuuksissa vertailukokekappaiden tasolle. Tutkimusten perusteella korvattaessa sementtiä jopa 30 %, saavutetaan vastaavat tulokset kuin vertailubetonilla. Jopa 50 %:n korvausasteella päästiin vielä vertailubetonin loppulujuuteen, mutta haittana metakaoliinin ja lentotuhkan suurella käytöllä oli alkulujuuksien hitaampi kehittyminen. Metakaoliinin osuus koko sideainemäärästä 50 %:n korvausasteella oli 20 %, joten toimiva metakaoliinin määrä on mahdollisesti 10-20 %:n välillä. Tulokset tukevat aikaisempia metakaoliinille suoritettuja kokeita. Esimerkiksi Ville Nikulan (2010) opinnäytetyössä ”Metakaoliinin käyttö betonissa sementin korvaajana” on saatu samansuuntaisia tuloksia metakaoliinin optimaaliselle määrälle betonissa, ilman lentotuhkajalosteiden käyttöä kokeissa.



## 6 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia metakaoliinin toimivuutta sementin korvaajana betonissa yhdessä lentotuhkajalosteiden kanssa. Opinnäytetyössä on selvitetty betonin koostumus ja ominaisuudet, yleisimpien sideaineiden ominaisuudet ja käyttökohteet sekä metakaoliinin käyttäytyminen sideaineena.

Tarkempia tutkimuksia tekemällä ja löytämällä oikea metakaoliinisuhde voitaisiin valmistaa betonia, jonka valmistus on ympäristöystävällisempää, ja jonka tekniset ominaisuudet ovat jopa hieman parempia verrattuna normaaliin Portland-sementistä valmistettuun betoniin. Metakaoliinia ja sen käyttöä sementin korvaajana on tutkittu jonkin verran esimerkiksi Amerikassa, mutta Suomesta saatavista kaoliinivaroista jalostettua metakaoliinia on tutkittu ainoastaan Morenia Oy:n toimesta.

Tehtyjen kokeiden perusteella voidaan päätellä, että metakaoliinilla onnistutaan tässä opinnäytetyössä käytettyjen lentotuhkajalosteiden kanssa korvaamaan osa sementistä. Haittana suurella korvausasteella on alkulujuuden hitaampi kehittyminen, mutta loppulujuudet vastaavat vertailubetonin arvoja. Jopa 40 – 50 %:n korvausasteella, josta metakaoliinin osuus on 12 – 20 %:a, saavutetaan vertailuarvojen kanssa samaa suuruusluokkaa olevia loppulujuuksia. Optimaalinen metakaoliinin määrä on mahdollisesti 15 – 20 % koko sideainemäärästä. Tuloksista voidaan päätellä myös metakaoliinin vaikutus lisäaineiden käytön tarpeeseen. Asteittain sementtiä vähennettäessä ja metakaoliinia lisättäessä lisäaineiden tehokkuus laskee, joten halutun notkeuden ja huokoisuuden saavuttamiseksi lisäaineiden määriä on kasvatettava.

Opinnäytetyön tulokset tukevat aikaisemmista samasta aiheesta tehtyjen kokeiden tuloksia. Optimaalisen metakaoliinisuhteen löytämiseksi on kuitenkin tehtävä jatkotutkimuksia, joissa sementin määrää vähennetään pienempi määrä kerrallaan. Olisi myös mielenkiintoista tietää, miten metakaoliinista valmistetun betonin lujuus kehittyisi matalammassa lämpötilassa.

## LÄHTEET

Betoni on monipuolinen rakennusmateriaali. 2006. TTK. Saatavissa:  
<http://www.tkk.fi/Yksikot/Talo/opetus/rvksu/rvksu2006/referaatit/alannekoiv/Referaatt22.doc>. Hakupäivä 15.6.2010.

BY 50: Betoninormit 2004. 2004. Jyväskylä: Suomen Betoniyhdistys r.y.

BY 201: Betonitekniikan oppikirja 2004. 2005. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys r.y.

Eijärvi, E. – Gehör, S. 2009. Valikoitujen teollisuusmineraalien etsintä ja teollinen hyödyntäminen Kainuussa. Ei kustannuspaikkaa eikä kustantajaa.

Finnsementti Oy. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi>.  
Hakupäivä 15.6.2010.

Geopolymer cement. 2010. Geopolymer Institute. Saatavissa:  
<http://www.geopolymer.org/applications/geopolymer-cement>. Hakupäivä 23.9.2010.

Grönholm, Sari – Alviola, Reijo – Kinnunen, Kari - Kojonen, Kari – Kärkkäinen, Niilo – Mäkitie, Hannu 2010. Retkeilijän kiviopas, Kaoliniitti. Geologian tutkimuskeskus. Saatavissa:  
[http://www.gtk.fi/export/sites/fi/Media/painotuotteet/retkeilijan\\_kiviopas/Kiviopas\\_suomi\\_netti.pdf](http://www.gtk.fi/export/sites/fi/Media/painotuotteet/retkeilijan_kiviopas/Kiviopas_suomi_netti.pdf). Hakupäivä 23.9.2010.

Lindberg, Ralf – Wahlman, Jyrki – Suonketo, Jommi – Paukku, Elina 2002. Kosteusvirtatutkimus. TTK. Saatavissa:  
<http://www.tut.fi/units/rak/rtek/tutkimusraportit/Raportti119.pdf>. Hakupäivä 5.6.2010.

Lentotuhkan käyttö betonissa. 2007. Saatavissa:

[http://www.betoniyhdistys.fi/index.php?\\_\\_EVIA\\_WYSIWYG\\_FILE=634&name=file](http://www.betoniyhdistys.fi/index.php?__EVIA_WYSIWYG_FILE=634&name=file). Hakupäivä 23.9.2010.

McCormick, Lauren 2007. Metakaolin. Saatavissa:

<http://people.ce.gatech.edu/~kk92/mkgrad.pdf>. Hakupäivä 15.6.2010.

Nikula, Ville. 2010. Metakaoliinin käyttö betonissa sementin korvaajana. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö. Insinööritoimisto.

Pikkarainen, Tuomo 2010. Projektipäällikkö, Morenia Oy. Palaveri 27.8.2010.

Ruukki. 2010. Saatavissa: [http://www.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/3AA5F2790701E71FC2257245002F1247/\\$File/Maanparannustuotteet%20masuunikuona,%20teraskuona.pdf?openElement](http://www.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/3AA5F2790701E71FC2257245002F1247/$File/Maanparannustuotteet%20masuunikuona,%20teraskuona.pdf?openElement). Hakupäivä

15.6.2010.

SFS-EN 12350-2 Tuoreen betonin testaus. Osa 2: Painuma. 2000. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto

SFS-EN 12350-6 Tuoreen betonin testaus. Osa 6: Tiheys. 2000. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto

SFS-EN 12350-7 Tuoreen betonin testaus. Osa 7: Ilmamäärä. Painomenetelmät. 2000. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto

SFS-EN 12390-3 Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus. 2002. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto

SFS-EN 12390-7 Kovettuneen betonin testaus. Osa 7: Kovettuneen betonin tiheys 2001, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto

SFS-EN 197-1 Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. 2004. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 933-1 Kiviainesten geometristen ominaisuuksien testaus. Osa 1: Rakeisuuden määrittäminen. Seulontamenetelmällä. 1997. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Sementti. 2010. Suomen Betonitieto Oy. Saatavissa:  
[http://www.betoni.com/iloa\\_opetukseen/default.asp?paa=13&ala1=47](http://www.betoni.com/iloa_opetukseen/default.asp?paa=13&ala1=47).  
Hakupäivä 15.6.2010.

Tepponen, Pirjo 2004. Huokostetun betonin valmistus. Saatavilla:  
<http://www.semtu.fi/?file=205>. Hakupäivä 15.6.2010.

Vornanen, Camilla – Penttala, Vesa 2008. Puuperäisestä lentotuhkasta uusi betonin seosaine. Teknillinen korkeakoulu, rakennusmateriaalitekniikka.